



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
MESTRADO EM GEOGRAFIA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES DA REDE DE DRENAGEM DEVIDA A  
URBANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE VOÇOROCAS EM QUATRO REGIÕES DO  
DISTRITO FEDERAL**

Leonardo Figueiredo de Freitas

Orientador: Renato Fontes Guimarães

Dissertação de Mestrado

Brasília, janeiro de 2012.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS – IH  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA – GEA  
MESTRADO EM GEOGRAFIA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES DA REDE DE DRENAGEM DEVIDA A  
URBANIZAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE VOÇOROCAS EM QUATRO REGIÕES DO  
DISTRITO FEDERAL**

Leonardo Figueiredo de Freitas

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial.

Aprovado por:

---

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães  
Universidade de Brasília – Departamento de Geografia  
Orientador

---

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior  
Universidade de Brasília – Departamento de Geografia  
Examinador Interno

---

Prof. Dr. Antonio José Teixeira Guerra  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Geografia  
Examinador Externo

---

Dr. Éder de Souza Martins  
Embrapa Cerrados  
Examinador Externo - Suplente

Brasília, 24 de janeiro de 2012.

## FICHA CATALOGRÁFICA

FREITAS, LEONARDO FIGUEIREDO DE.

Análise da Influência das Alterações da Rede de Drenagem Devida a Urbanização no Desenvolvimento de Voçorocas em Quatro Regiões do Distrito Federal, 108p., 297 mm, (UnB-GEA, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia.

1. Erosão

2. Urbanização

3. Fluxo Acumulado

4. Geoprocessamento

I. UnB-IH-GEA

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREITAS, L. F. **Análise da Influência das Alterações da Rede de Drenagem Devida a Urbanização no Desenvolvimento de Voçorocas em Quatro Regiões do Distrito Federal.** 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2012.

## CESSÃO DE DIREITOS

Nome do autor: Leonardo Figueiredo de Freitas

Título da dissertação: Análise da Influência das Alterações da Rede de Drenagem Devida a Urbanização no Desenvolvimento de Voçorocas em Quatro Regiões do Distrito Federal.

Grau/ano: Mestre/2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Leonardo Figueiredo de Freitas

## **Agradecimentos**

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho pudesse se concretizar;

À minha família, que sempre me apoiou em minhas empreitadas;

À Anna Paula, pela motivação, apoio e compreensão;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães, pela paciência, confiança, amizade, oportunidades e incentivos;

Aos professores Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Dr. Éder de Souza Martins e Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, pelas contribuições, amizade e oportunidades;

Aos amigos e amigas do LSIE: Antônio Felipe Couto Júnior, Clarisse Lacerda Mata, Daniel Gomes dos Santos Wendriner Loebmann, Fabiana Hessel, Frederico dos Santos Soares, Kelly Maria Resende Borges, Maria Elisabete Silveira Borges, Marcus Fábio Ribeiro Farias, Verônica Moreira Ramos, Vinicius Vasconcelos de Souza;

Aos funcionários da secretaria da Pós-Graduação do Departamento de Geografia, que sempre se mostraram dispostos a resolver os problemas de última hora.

## Resumo

A alteração da superfície do terreno em decorrência da urbanização, por meio da instalação de estruturas como arruamentos e edificações, altera significativamente a dinâmica do escoamento superficial. Uma das consequências dessa alteração é a concentração do escoamento para algumas zonas, o que pode desencadear o aparecimento de processos erosivos, como ravinhas e voçorocas. Esses processos além dos impactos a jusante, também ameaçam a própria estrutura urbana pelo avanço das erosões. O presente trabalho tem como objetivo aplicar um método desenvolvido para identificar zonas suscetíveis à ocorrência desses processos erosivos em quatro regiões do Distrito Federal: Gama, Jardim Botânico Ceilândia e Incra 8. Com isso, verificar se os fatores que influenciam no desenvolvimento desses processos erosivos estão relacionados, apenas, com a alteração da superfície pela área urbana e/ou se existem outros fatores. O método é baseado na definição de dois cenários: a) pré-urbanizado e b) pós-urbanizado. Assim, para cada cenário, foram gerados modelos digitais de terreno e mapas de fluxo acumulado para cada uma das quatro áreas estudadas. A partir dos dados gerados, foram obtidos os mapas da alteração do fluxo acumulado, onde são apontadas as zonas que receberam aumento ou redução do fluxo em decorrência da urbanização. Também foram comparados os locais de ocorrência das voçorocas com informações de geologia, geomorfologia e pedologia, o que indicou a existência de dois grupos: Gama/Jardim Botânico e Ceilândia/Incra 8. Outro parâmetro analisado foi a declividade nas áreas das ravinhas/voçorocas, onde, todas as cicatrizes das ravinhas/voçorocas estudadas foram mapeadas e os valores de declividade analisados. Com base nesses valores observou-se que a declividade é fundamental na definição das zonas suscetíveis. O resultado dessa análise em conjunto com a concentração do fluxo acumulado ficou altamente correlacionado com as erosões identificadas no Gama, Jardim Botânico e Incra 8. Na Ceilândia, apenas uma das voçorocas mapeadas foi identificada pelos parâmetros do modelo, as outras não foram identificadas como sendo área suscetível, nem pela concentração de fluxo, nem pela declividade, tendo sua origem em outros fatores. Esse método pode ser utilizado para auxiliar no planejamento de novas áreas de expansão urbana, ou, para replanejar áreas já existentes, em regiões com características semelhantes as do Distrito Federal, pois, os resultados demonstraram que nas zonas onde ocorre concentração de fluxo e declividade acima de 5% são mais suscetíveis aos processos erosivos.

**Palavras chave:** modelo digital de terreno, mapa de fluxo acumulado, erosão, hidrologia urbana, drenagem urbana.

## Abstract

The change of ground surface as a result of urbanization through the installation of structures such as roads and buildings, significantly changes the dynamics of runoff. One consequence of this change is the concentration of the runoff to some areas, what can cause erosions, such as ravines and gullies. These processes beyond the downstream impacts also threaten urban structure due advance of erosion. The present work aims to apply a method developed to identify areas susceptible to the occurrence of erosion in four regions of the Distrito Federal: Gama, Jardim Botânico, Ceilândia and Incra 8. To, verify if the factors that influence the development of erosion processes are related only to the change in surface area by urban and / or other factors. The method is based on the definition of two scenarios: a) pre-urbanized and b) post-urbanized. Thus, for each scenario were generated digital elevation models and flow accumulation maps for each of the four areas studied. Based on data generated, was obtained change flow accumulation maps where were identified regions that flow was increased or decreased due urbanization. Were also compared the occurrence of gully sites with information on geology, geomorphology and pedology, which indicated the existence of two groups: Gama / Jardim Botânico and Ceilândia / Incra 8. Another parameter analyzed was the slope in the ravines/gullies areas, where all the scars of the ravines/gullies studied were mapped and the values of slope analyzed. Based on these values was observed that the slope is crucial in definition of susceptible areas. The analysis result when compared with the concentration of flow accumulation was highly correlated with the erosions identified in the Gama, Jardim Botânico and Incra 8. In Ceilândia, only one of the mapped gullies was identified by the model, the others were not identified as being susceptible area, neither the concentration nor the slope, being other factors responsible for the process. This method can be used to assist the planning of new areas of urban expansion, or to replanning existing areas, in regions with characteristics similar to those of the Distrito Federal, because, was demonstrated by the results that areas where occur concentration of flow and slope above 5% are very susceptible to erosion.

**Keywords:** digital elevation models, flow accumulation, erosion, urban hydrology, urban drainage.

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo Geral .....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	2
2.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1.	Processos Erosivos .....	4
2.2.	Desagregação das Partículas de Solo.....	4
2.3.	Escoamento superficial.....	5
2.4.	Escoamento em Lençol.....	5
2.5.	Fluxo Linear.....	5
2.6.	Ravinas e Voçorocas .....	6
2.7.	Erosão Urbana .....	7
2.8.	Hidrologia Urbana.....	7
2.9.	Modelo Digital de Terreno.....	8
2.10.	Modelagem Hidrológica .....	9
2.10.1.	Obtenção de mapas de fluxo acumulado.....	11
3.	CARACTERIZAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL.....	14
3.1.	Histórico de ocupação .....	14
3.2.	Vegetação .....	15
3.3.	Clima .....	17
3.4.	Geologia.....	18
3.4.1.	Grupo Paranoá. ....	20
3.4.2.	Grupo Canastra .....	20
3.4.3.	Grupo Araxá .....	21
3.4.4.	Grupo Bambuí .....	21
3.5.	Solos.....	21
3.6.	Geomorfologia .....	24
3.6.1.	Evolução geomorfológica do Distrito Federal .....	24
3.6.2.	Unidades Geomorfológicas .....	25
3.7.	A erosão no DF.....	27
3.8.	Áreas de estudo .....	31
3.8.1.	Gama .....	31
3.8.2.	Jardim Botânico.....	32

3.8.3.	Ceilândia .....	34
3.8.4.	Incra 8.....	34
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1.	MDT .....	36
4.1.1.	Pré-processamento .....	36
4.1.2.	Ajustes dos parâmetros de interpolação do Topo To Raster .....	39
4.1.3.	MDTs pré e pós-urbano.....	42
4.2.	Fluxo acumulado.....	43
4.3.	Mapa de identificação da alteração do fluxo acumulado. ....	44
4.4.	Classes de relevo.....	46
4.5.	Declividades nas voçorocas .....	46
4.6.	Mapas de Geologia, Solos e Geomorfologia.....	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1.	Resultados.....	48
5.1.1.	Gama .....	48
5.1.1.	Jardim Botânico.....	55
5.1.2.	Ceilândia .....	62
5.1.3.	Incra 8.....	69
5.2.	Análise das voçorocas segundo os condicionantes físicos .....	76
5.2.1.	Análise das voçorocas com as classes de relevo .....	76
5.2.2.	Análise das voçorocas com a geologia .....	76
5.2.3.	Análise das voçorocas com a geomorfologia .....	76
5.2.4.	Análise das voçorocas com as classes de solos .....	76
5.2.5.	Análise das voçorocas com a declividade .....	77
5.3.	Discussão dos resultados.....	84
6.	CONCLUSÕES .....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
	ANEXO A.....	92

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Gráfico comparativo do comportamento do escoamento superficial antes e depois da urbanização (modificado de LEOPOLD, 1968).....	8
Figura 2.2 – A bacia referente ao ponto P está representada pela área cinza. Esta área é denominada área de contribuição parcial (Modificado de O’Loughlin, 1986).....	10
Figura 2.3 - Representação do modelo hidrológico desenvolvido por O’Loughlin (1986). (modificado de MONTGOMERY & DIETRICH, 1994).....	11
Figura 2.4 – Representação esquemática da distribuição de fluxo no método D8 de acordo com os valores de declividade dos pixels vizinhos. ....	12
Figura 2.5 – Representação do método $D_{\infty}$ , onde o fluxo assume uma determinada direção de acordo com a maior declividade. (Modificado de TARBOTON, 1997).....	13
Figura 3.1 – Localização do Distrito Federal.....	14
Figura 3.2 – Mapa Geológico simplificado do DF (modificado de FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1999).....	18
Figura 3.3 – Coluna estratigráfica do Distrito Federal com a possível ordem de deposição, mas que atualmente apresentam inversões e complicações em função dos sistemas de cavalgamentos (FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1999).....	19
Figura 3.4 – Mapa simplificado das Classes de Solos do Distrito Federal (Modificado de BRASIL, 2003) .....	22
Figura 3.5 – Mapa geomorfológico do DF (Modificado de NOVAES PINTO, 1990).....	27
Figura 3.6 – Erosões cadastradas por Martins (2005) utilizadas como base no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2008).....	29
Figura 3.7 – Situação da rede de drenagem pluvial (DISTRITO FEDERAL, 2008). ....	30
Figura 3.8 – Localização das quatro áreas de estudo, Gama, Condomínios do Jardim Botânico, Ceilândia e Incra 8.....	31
Figura 3.9 – Área do Gama com as voçorocas/ravinas em detalhe. ....	32
Figura 3.10 – Área do Jardim Botânico com as voçorocas/ravinas em detalhe. ....	33
Figura 3.11 – Área da Ceilândia com as voçorocas/ravinas em detalhe.....	33
Figura 3.12 – Área do Incra 8 com as voçorocas/ravinas em detalhe. ....	34
Figura 4.1 – Mosaico de imagens GeoEye de 24/03/2010, obtidas por meio de captura de tela no software Google Earth, elaborado e georreferenciado no ArcGIS. ....	35
Figura 4.2 – Curvas de nível originais (CODEPLAN/SICAD-1992) e editadas para eliminar as feições antrópicas. ....	38
Figura 4.3 – Vetores de hidrografia antes (a) e após (b) a correção da direção de fluxo. ....	38
Figura 4.4 – Resultados dos perfis a partir de MDTs elaborados com parâmetros padrão e ajustados. Perfil 1: local com declividade média, pequena suavização da altimetria e grande suavização da declividade; Perfil 2:	

local com declividade mais acentuada, pequena suavização da altimetria e grande suavização da declividade; Perfil 3: local plano: diferenças insignificantes na altimetria e pequena suavização da declividade. ....	41
Figura 4.5 – Comparação dos mapas de fluxo acumulado obtidos de MDT sem ajustes (a) e com ajuste (b) na interpolação. No (a) as curvas de nível ficam marcadas na superfície simulando falsas elevações. Já no (b) há uma suavização da concentração do fluxo acumulado. ....	42
Figura 4.6 – (a) Pontos com informações extraídas do MDT pré-urbano; e (b) pontos selecionados pelos polígonos das quadras com valores do MDT pré-urbano com mais quatro metros adicionados. ....	43
Figura 4.7 – Perfis topográficos dos terrenos pré-urbanização (a), e pós-urbanização (b). ....	44
Figura 4.8 – Necessidade de ajuste dos vetores dos arruamentos ao relevo para que o fluxo corra para o ponto mais baixo. a) vetores inteiros; b) vetores segmentados de 10 em 10 metros; e c) direção de fluxo dos vetores segmentados corrigida pelo MDT. O ponto p indica o local onde o terreno apresenta uma depressão e como a correção do fluxo se ajusta a esta situação. ....	45
Figura 4.9 – Cicatriz da voçoroca e os pontos com os valores de declividade correspondente. ....	47
Figura 5.1 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas no Gama. ....	48
Figura 5.2 – Perfis topográficos da área urbana do Gama. Ambos mostram a ruptura de declive entre a chapada e o vale dissecado. ....	49
Figura 5.3 – a) ocorrência de ravina coincidindo com o fim do arruamento e b) na continuação da ravina a ocorrência de uma voçoroca. ....	50
Figura 5.4 - Modelo digital de terreno do Gama (pré-urbanização). ....	52
Figura 5.5 – Mapa de fluxo acumulado do Gama (pré-urbanização). ....	52
Figura 5.6 – Modelo digital de terreno do Gama (pós-urbanização). ....	53
Figura 5.7 – Mapa de fluxo acumulado do Gama (pós-urbanização). ....	53
Figura 5.8 – Mapa da alteração do fluxo acumulado no Gama (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). Os círculos representam os pontos que tiveram aumento de fluxo e produziram voçorocas e os quadrados representam os pontos que não apresentaram aumento de fluxo e não produziram voçorocas. ....	54
Figura 5.9 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo à pré e pós-urbanização. Os círculos (voçorocas) e os quadrados (não voçorocas) estão também representados na Figura 5.8. ....	54
Figura 5.10 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas no Jardim Botânico. ....	55
Figura 5.11 – Perfis topográficos da área do Jardim Botânico. Apenas o perfil AB mostra a ruptura de declive entre a chapada e o vale dissecado, o perfil CD acompanha a chapada. ....	56

Figura 5.12 – a) Desenvolvimento de uma ravina; e b) construção de equipamentos de coleta de águas pluviais para desviar o fluxo que estava ocasionando a erosão (a). .....	57
Figura 5.13 – Fotografia a partir da bacia de contenção apresentada na Figura 5.12b. ....	57
Figura 5.14 – Modelo digital de terreno do Jardim Botânico (pré-urbanização). ....	59
Figura 5.15 – Mapa de fluxo acumulado do Jardim Botânico (pré-urbanização). ....	59
Figura 5.16 – Modelo digital de terreno do Jardim Botânico (pós-urbanização). ....	60
Figura 5.17 - Mapa de fluxo acumulado do Jardim Botânico (pós-urbanização). ....	60
Figura 5.18 – Mapa da alteração do fluxo acumulado no Jardim Botânico (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). Os círculos representam os pontos que tiveram aumento de fluxo e produziram ravinas/voçorocas e os quadrados representam os pontos que não apresentaram aumento de fluxo e não produziram ravinas/voçorocas. ....	61
Figura 5.19 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo a pré e pós urbanização. Os círculos (ravinas/voçorocas) e os quadrados (não ravinas/voçorocas) estão também representados na Figura 5.18. ....	61
Figura 5.20 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas na Ceilândia. ....	62
Figura 5.21 – Perfis topográficos da área da Ceilândia. Ambos mostram que não há ruptura de declive acentuada entre a chapada e o vale. ....	64
Figura 5.22 – Modelo digital de terreno da Ceilândia (pré-urbanização). ....	65
Figura 5.23 – Mapa de fluxo acumulado da Ceilândia (pré-urbanização). ....	65
Figura 5.24 – Modelo digital de terreno da Ceilândia (pós-urbanização). ....	66
Figura 5.25 – Mapa de fluxo acumulado da Ceilândia (pós-urbanização). ....	66
Figura 5.26 – Mapa da alteração do fluxo acumulado na Ceilândia (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). No caso da Ceilândia os pontos onde foram identificadas voçorocas (círculos) não apresentaram aumento do fluxo acumulado, exceto o círculo 6. E os pontos onde houve aumento de fluxo não apresentam voçorocas. ....	67
Figura 5.27 – Estruturas do sistema de drenagem de águas pluviais. No destaque (a) parte da estrutura de coleta das águas pluviais, (b) estrutura para descarga da água coletada e (c) estrutura da adutora da CAESB. ....	68
Figura 5.28 – Foto a) mostra o detalhe da Figura 5.27b em campo; foto b) apresenta estrutura de coleta de águas pluviais que fica no canteiro central da BR-070, similar ao do detalhe na Figura 5.27a. ....	68
Figura 5.29 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo a condição pré e pós urbanização. Os círculos (com erosões) e os quadrados (sem erosões) estão também representados na Figura 5.26. Nessa área houve uma inversão dos pontos com ocorrência de erosões e aumento do fluxo acumulado. ....	69
Figura 5.30 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas no Incra 8. ....	70

Figura 5.31 – Perfis topográficos da área do Incra 8. Ambos mostram a convexidade deste terreno, que apresenta declividades pouco acentuadas.....	71
Figura 5.32 – Modelo digital de terreno do Incra 8 (pré-urbanização).....	72
Figura 5.33 – Mapa de fluxo acumulado do Incra 8 (pré-urbanização).....	72
Figura 5.34 – Modelo digital de terreno do Incra 8 (pós-urbanização).....	73
Figura 5.35 – Mapa de fluxo acumulado do Incra 8 (pós-urbanização).....	73
Figura 5.36 – a) Imagem de satélite de 2003 onde é possível ver a voçoroca e parte da área urbana do Incra 8; b) Imagem de satélite de 2010 na qual a voçoroca já foi recuperada e a área urbana ganhou incrementos de arruamentos. ....	74
Figura 5.37 – Mapa de alteração do fluxo acumulado no Incra 8 (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). Os círculos representam os pontos que tiveram aumento de fluxo e produziram erosões e os quadrados representam os pontos que não apresentaram aumento de fluxo e não produziram erosões.....	75
Figura 5.38 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo a pré e pós urbanização. Os círculos (com erosões) e os quadrados (sem erosões) estão também representados na Figura 5.37.....	75
Figura 5.39 – Comparação das classes de declividades com a localização das voçorocas nas quatro áreas de estudo.....	78
Figura 5.40 – Localização das voçorocas em relação a geologia.....	79
Figura 5.41 – Localização das voçorocas em relação a geomorfologia.....	80
Figura 5.42 – Localização das voçorocas em relação aos solos.....	81
Figura 5.43 – Declividade classificada de acordo com os valores de declividade média identificados na Tabela 5.1 e separada em três classes. No Incra 8 os três pontos que aparecem são da mesma voçoroca e o triangulo é referente a um processo de erosão em lençol.....	83
Figura 5.44 – Percentual de erosões cadastradas por Martins (2005) em relação à declividade.....	84

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – População do Distrito Federal nos Censos Demográficos por situação do domicílio. ....	15
Tabela 4.1 - Configuração dos parâmetros do Topo to Raster para cada tipo de dado de entrada. ....	40
Tabela 5.1 – Comparação dos valores de declividade nas áreas das voçorocas. As células em vermelho representam as voçorocas nas quais o modelo de alteração de fluxo identificou aumento de fluxo; As células em verde representam as voçorocas nas quais o modelo não identificou aumento de fluxo acumulado. ....	82

## Lista de Siglas e Abreviaturas

APA – Área de Proteção Ambiental  
APP – Áreas de preservação permanente  
Aw – Clima tropical, com inverno seco  
C – Cambissolo  
CAD – “*Computer-Aided Design*”  
CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal  
CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal  
Cwa – Clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão quente  
Cwb – Clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno  
DF – Distrito Federal  
Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
ESAF – Escola de Administração Fazendária  
ESRI – “*Environmental Systems Research Institute*”  
Fe – Ferro  
FZB-DF – Fundação Zoobotânica do Distrito Federal  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IDW – “*Inverse Distance Weighted*”  
Km – Quilômetro  
LV – Latossolo Vermelho  
LVA – Latossolo Vermelho-Amarelo  
m – Metro  
MDT – Modelo Digital de Terreno  
RA – Região Administrativa  
RIDE – Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno  
S – Sul  
SE – Sudeste  
SICAD – Sistema Cartográfico do Distrito Federal  
SIG – Sistema de Informações Geográficas  
SW - Sudoeste  
TIN – “*Triangular Irregular Network*”  
UnB – Universidade de Brasília  
W – Oeste  
ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades de forma desregrada, em locais impróprios e sem infraestrutura adequada, acarreta vários problemas, entre eles os hidrológicos. Com a urbanização ocorre a impermeabilização total ou parcial do solo, que não permite a infiltração da água da chuva de forma eficiente, resultando em um aumento do escoamento superficial concentrado pelos arruamentos e galerias de águas pluviais (PORTO *ET AL.*, 2004).

Alguns impactos ambientais podem ser explicados com base no estudo da geomorfologia local, dado o papel integrador desta área do conhecimento, pois visa entender a evolução espaço-temporal do modelado terrestre antes e depois da intervenção humana (CUNHA & GUERRA, 2010).

Os cursos d'água constituem-se em um dos principais processos morfogenéticos ativos na esculturação da paisagem terrestre. Desta forma a análise da rede hidrográfica é imprescindível na tentativa de se compreender e elucidar algumas questões geomorfológicas (CHRISTOFOLETTI, 1980).

O crescimento das cidades e falta de políticas públicas resultam em problemas como: alagamentos, movimento de massa, erosões ameaçando cidades, entre outros problemas de ordem ambiental e que geram problemas sociais.

O aumento e o adensamento de áreas ocupadas por edificações e pavimentos alteram a superfície topográfica e suas dinâmicas hidrológicas, incrementando o volume de água. A impermeabilização do solo gera um aumento, não só, do volume do escoamento superficial, mas também da velocidade do fluxo. Este quando não dissipado, tende a iniciar e/ou catalisar os processos de desenvolvimento das voçorocas (SALOMÃO, 1999; BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007). Assim, como nos ambientes urbanos há uma tendência de canalizar e concentrar o escoamento superficial, seja pelos arruamentos, seja pela coleta das águas pluviais, é necessário que se façam obras no intuito de não deixar que esse fluxo chegue direto nos canais naturais e encostas.

As voçorocas em ambientes urbanos apresentam desenvolvimento acelerado e podem representar risco às pessoas e prejuízos devido à perda de equipamentos urbanos, como ruas, pontes, entre outros (OLIVEIRA *et al.*, 1987; BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007).

Como o planejamento da ocupação do solo requer certo grau de previsão e uma visão holística (CUNHA & GUERRA, 2010), a utilização de ferramentas de geoprocessamento pode auxiliar na simulação dos cenários e na identificação dos

potenciais fatores que contribuem para a ocorrência dos processos erosivos (RAMOS *et al.*, 2002).

A identificação de áreas vulneráveis à ocorrência de processos erosivos, decorrente das alterações hidrológicas e/ou de suscetibilidade natural do terreno, permite atuar de forma preventiva. Uma das maneiras de fazer a identificação de alterações da dinâmica do escoamento superficial é utilizando a modelagem computacional, que por meio de um modelo hidrológico adequado ao ambiente urbano possibilita uma visão mais ampla do problema (MARK *et al.*, 2004; CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2010), uma vez que, com a modelagem é possível identificar as áreas com suscetibilidade à erosão devido à concentração do fluxo (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2010).

Este trabalho busca entender a real influência das áreas urbanas nos processos erosivos e a relação com a geomorfologia subsidiando a identificação de zonas suscetíveis à ocorrência de voçorocas. Essa temática vem sendo explorada pela comunidade acadêmica (MORTARI, 1984; MARTINS, 2005; ARCAYA, 2007; CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2010; entre outros), uma vez que, o aumento das áreas urbanas e a falta do planejamento adequado têm desencadeado processos erosivos, como no caso das cidades do DF: Santa Maria, Vicente Pires, Arniqueiras, e no Goiás: Planaltina de Goiás. Todas têm em comum a presença de voçorocas que avançam para a área urbana, condenando moradias, prédio públicos, e obras de infraestrutura como ruas e tubulações.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é identificar na paisagem as áreas mais susceptíveis à ocorrência de voçorocas devido às alterações da dinâmica de fluxo superficial pelos elementos urbanos, como: construções e arruamentos para tanto foi aplicado um método baseado em parâmetros morfométricos do terreno (altimetria e fluxo acumulado) referente aos períodos pré e pós-urbanização.

Esse método foi aplicado em quatro áreas no Distrito Federal, que apresentam voçorocas e ravinas, a fim de verificar se os fatores que influenciam no desenvolvimento desses processos erosivos estão relacionados, apenas, com a alteração da superfície pela área urbana e/ou se existem outros fatores ambientais.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Elaboração de modelos digitais de terreno que simulem a topografia pré-urbanização e pós-urbanização;

- Elaboração de mapas de fluxo acumulado, baseados nos modelos digitais de terreno, pré e pós-urbanização, a fim de identificar a alteração do padrão na drenagem e o conseqüente acúmulo de fluxo para pontos específicos;
- Verificar se a concentração do fluxo em decorrência da urbanização apresenta correlação com os processos erosivos observados.
- Analisar qual o grau de influência que a implantação dos aparatos urbanos, como os arruamentos e as edificações, têm no desenvolvimento das voçorocas.
- Análise das declividades nas cicatrizes das voçorocas e ravinas para verificação do controle topográfico.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Processos Erosivos

Erosão é um processo de desgaste da superfície do terreno acarretando na remoção, transporte e depósito de partículas a partir dos agentes erosivos, como água, vento, etc. (GUERRA, 2003; BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007). A ação antrópica pode intensificar esse processo, pois quando se passa a manejar o solo, as relações que mantêm sua estabilidade são afetadas. Este fato aliado ao uso inadequado do solo, em relação à sua aptidão, propicia o aumento de processos de degradação causados, principalmente, pela erosão hídrica, sendo a água o principal agente erosivo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990). As variações nas taxas de erosão estão relacionadas aos fatores controladores, erosividade da chuva, propriedades do solo, cobertura vegetal e características das encostas. A interação destes fatores fornece o grau de vulnerabilidade à erosão (WISCHMEIER & SMITH, 1978; GUERRA, 2003).

Os processos erosivos de origem pluvial são os mais importantes modeladores da paisagem. Esse é um processo que atua em quase toda a superfície terrestre, mas, nas regiões tropicais eles têm um papel mais ativo, devido a grande ocorrência de chuvas, e em alguns casos à concentração destes eventos em determinadas épocas do ano. Esses processos agem de duas formas, a primeira é pelo impacto das gotas de chuva (*splash*) que desagregam partículas do solo e a segunda pelo fluxo do escoamento superficial que carrega as partículas resultantes do primeiro processo e também outras que o próprio processo produz (CHRISTOFOLETTI, 1980; BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007; GUERRA, 2010).

### 2.2. Desagregação das Partículas de Solo

O *splash* é o estágio inicial do processo erosivo. Pois, o impacto das gotas de água da chuva, promove a desagregação e o transporte de partículas do solo. Além da desagregação e transporte das partículas, as gotas de chuva podem provocar uma reorientação das partículas, que preenchem os poros superficiais do solo, promovendo a selagem do solo e dando início ao escoamento superficial, devido diminuição de sua capacidade de infiltração (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990; GUERRA, 2003; 2010; BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007). De acordo com Guerra (2010) a energia cinética das gotas de chuva é que vai definir a intensidade da desagregação das partículas de solo e é o fator que determina a erosividade da chuva, habilidade da chuva em produzir erosão.

Dependendo da composição do solo os agregados podem ser mais ou menos resistentes aos impactos das gotas de chuva, sendo que os solos que tem maior teor de

matéria orgânica e de argila são mais estáveis do que os que apresentam alta concentração de silte, isso se deve as complexas interações de propriedades físicas e químicas que estabelecem a erodibilidade do solo (WISCHMEIER & MANNERING, 1969, GUERRA, 2003; 2010).

A diminuição da capacidade de infiltração gera outro efeito, que é o aumento do escoamento superficial. A formação das crostas altera a dinâmica na superfície, que antes atuava com maior destacamento e baixo transporte, e passa a atuar com menor destacamento e alto transporte, devido o escoamento superficial (GUERRA, 2003; 2010).

### **2.3. Escoamento superficial.**

A saturação do solo é uma etapa fundamental nos processos erosivos, pois é por meio desta que ocorrem as poças que, eventualmente, darão início ao escoamento superficial (GUERRA, 2010). O escoamento superficial é um poderoso agente de erosão e atua de forma seletiva, de acordo com a sua capacidade de transporte. Em baixas declividades atua sobre os sedimentos mais finos. Pode ser considerado um agente erosivo quando seu poder de erosão for maior que a coesão do solo (BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007).

O poder erosivo da água em movimento depende de fatores como a densidade e a velocidade do escoamento, espessura da lamina d'água e da inclinação e comprimento da vertente ou relevo (BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007).

### **2.4. Escoamento em Lençol**

Inicialmente, o escoamento superficial se desenvolve como um fluxo laminar, ou escoamento em lençol, que tem como característica um fluxo difuso. Esse fluxo laminar provoca a erosão laminar, ou em lençol, que arrasta partículas que já se encontravam soltas ou que foram desagregadas pelo impacto das gotas de chuva (GUERRA, 2003; 2010; BIGARELLA, BECKER & SANTOS, 2007). O escoamento em lençol passa a se concentrar em canais acidentais quando ganha velocidade e volume (HORTON, 1945), iniciando-se pequenas incisões nos solos e que podem evoluir para ravinas (GUERRA, 2010).

### **2.5. Fluxo Linear**

O fluxo linear é a etapa seguinte ao escoamento em lençol, onde ocorre um aumento do fluxo e uma diminuição da velocidade devido ao aumento da rugosidade, entretanto a concentração de sedimentos no interior do fluxo aumenta o atrito entre as partículas e o fundo do canal, aumentando o poder de erosão (GUERRA, 2010).

Segundo Guerra (2010), o desenvolvimento das ravinas passa pelos seguintes estágios: microrravinas, microrravinas com cabeceiras e desenvolvimento de bifurcações. Cada estágio apresenta uma característica mais intensa no processo de erosão, caminhando para o desenvolvimento de voçorocas.

## **2.6. Ravinas e Voçorocas**

Horton (1945) define ravinas como feições próximas que se desenvolvem em canais paralelos e tem limitação espacial. Desenvolvem-se ao longo das encostas devido o aumento da velocidade do escoamento superficial. Esse aumento do gradiente hidráulico pode ter várias origens, como o aumento da intensidade da chuva, do gradiente da encosta ou porque a capacidade de armazenamento de água na superfície é excedida gerando as incisões no solo (GUERRA, 2003).

Segundo Guerra (2003) as ravinas podem, excepcionalmente, evoluir para um canal de água permanente, sendo que nesta situação já é considerada uma voçoroca. Com isso podemos considerar que ravinas são, em alguns casos, os estágios iniciais de voçorocas.

A definição do que é uma ravina é um tema bem controvertido do ponto de vista geomorfológico. Isso porque vários autores utilizaram o termo para características diversas (GUERRA, 1997). Existem várias classificações acerca dos limites entre voçorocas e ravinas. Goudie *apud* Guerra (2003) expõe um método mais empírico, onde as ravinas podem ser controladas por máquinas agrícolas, ao contrário das voçorocas. Já o Glossário de Ciências dos Solos, dos Estados Unidos *apud* Guerra (2003) apresenta dimensões mensuráveis para tal definição: Voçorocas têm mais de 0,5m de largura e de profundidade. Entretanto Guerra (2003) propõe que os valores para tal definição deva ser aplicada para cada região, em especial, para voçorocas desenvolvidas a partir de ravinas.

De acordo com Bigarella, Becker & Santos (2007) a voçoroca é um fenômeno nitidamente hídrico que envolve as águas superficiais e subsuperficiais, podendo desenvolver-se a partir da concentração do fluxo em pequenos canais que com o passar do tempo ganham dimensões maiores.

Guerra (2003) descreve as voçorocas como feições com características relativamente permanentes nas encostas, apresentando paredes laterais íngremes, geralmente, fundo chato e durante eventos chuvosos, apresentam fluxo d'água em seu interior, em alguns casos o processo é tão intenso que chegam a atingir o lençol freático. O avanço da voçoroca se dá pelo solapamento do material das paredes, o que resulta em seu aprofundamento e tamanho. O que diferencia as voçorocas dos canais de drenagem é a maior profundidade e menor largura.

Nas áreas urbanas, onde há impermeabilização do terreno pelas pavimentações e construções, pode ocorrer um aumento de volume e velocidade do fluxo de água acelerando o desenvolvimento de ravinas e voçorocas (SALOMÃO, 1999).

## **2.7. Erosão Urbana**

A erosão urbana tem sua origem na falta de planejamento adequado, considerando o meio físico, condições sociais e econômicas das tendências de desenvolvimento da área urbana (ARCAYA, 2007). Assim, o rápido crescimento da população urbana, tem como consequência a expansão da área urbana. Isso ocorre sem o devido planejamento e muitas vezes quando existe algum planejamento, são inadequados e ineficientes (MARTINS, 2005).

Há também o problema das obras de drenagem mal dimensionadas, que se deterioram em um curto período de tempo, ou, a não existência de estruturas de dissipação no lançamento final pelos emissários e a falta de conservação e manutenção das estruturas (MARTINS, 2005). A questão da erosão em áreas urbanas está diretamente ligada às problemáticas da hidrologia urbana.

## **2.8. Hidrologia Urbana**

A Hidrologia Urbana é um ramo da Hidrologia Aplicada, que tem como objeto os problemas decorrentes da utilização dos recursos hídricos, preservação do meio ambiente e ocupação da bacia (TUCCI, 2004).

O conceito de hidrologia urbana é bem amplo, abrangendo todas as relações hidrológicas em áreas afetadas direta ou indiretamente pela urbanização. Uma subárea da hidrologia urbana é a drenagem urbana, que inicialmente, objetivava acabar com as águas pluviais em excesso nos ambientes urbanos de forma eficaz, a fim de evitar transtornos e prejuízos (PORTO *et al.*, 2004).

O sistema de drenagem é composto por relações complexas entre a topografia local, o tipo de solo, a cobertura vegetal, entre outros (CUNHA & GUERRA, 2010). A construção de edificações, ruas, galerias de águas pluviais, calçadas e outras estruturas urbanas, altera a dinâmica antes existente (PORTO *et al.*, 2004).

Uma consequência da urbanização é a impermeabilização total ou parcial do solo, que não permite a infiltração da água da chuva de forma eficiente, resultando em um aumento do escoamento superficial concentrado pelos arruamentos e galerias de águas pluviais (PORTO *et al.*, 2004). Junto a esse aumento poderá ocorrer a concentração do escoamento em um intervalo de tempo menor (Figura 2.1), causando um evento intenso (LEOPOLD, 1968).

O aumento do volume em um intervalo de tempo menor quando não dissipado, tende a catalisar os processos de desenvolvimento das voçorocas (SALOMÃO, 1999), que na maioria das vezes, geram além da perda de solos, destruição ou comprometimento de equipamentos públicos, casas, áreas de lazer entre outros (OLIVEIRA *et al.*, 1987).

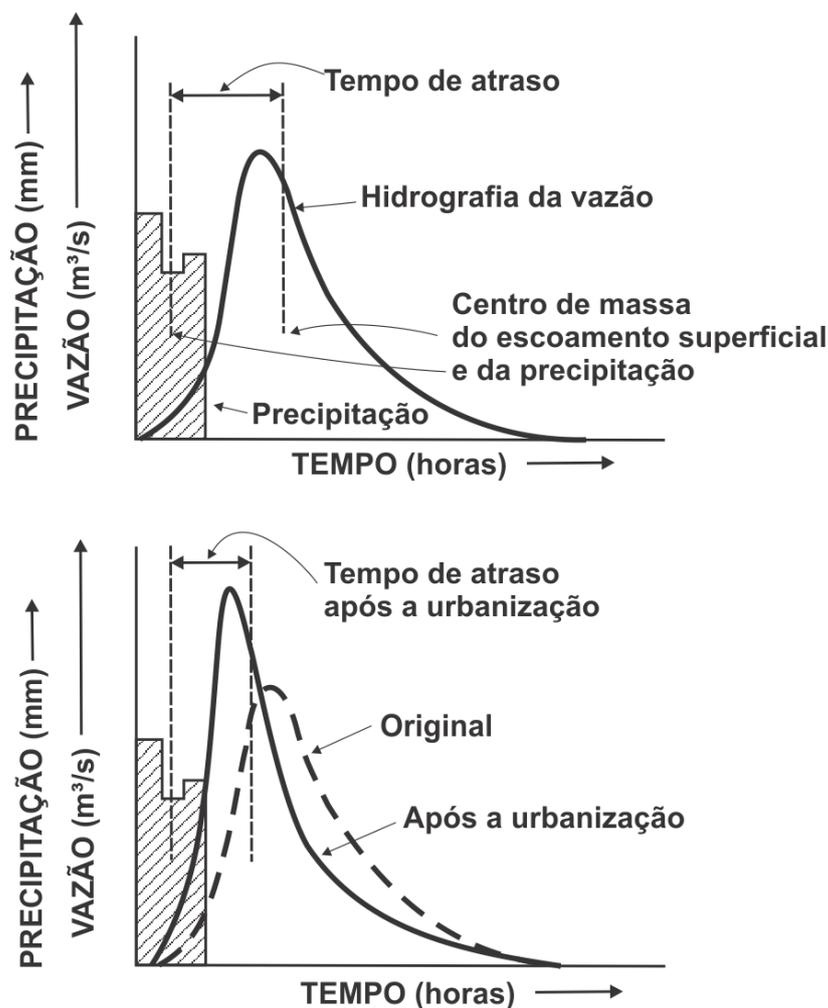


Figura 2.1 – Gráfico comparativo do comportamento do escoamento superficial antes e depois da urbanização (modificado de LEOPOLD, 1968).

Apesar da elaboração de um plano diretor de drenagem urbana ser uma medida altamente recomendável, nem sempre é feito de forma adequada, ou, muitas vezes nem é feito, devido ao rápido desenvolvimento das áreas urbanas, que se dão nas formas mais precárias. De acordo com Porto *et al.* (2004) esse instrumento possibilita estabelecer um desenvolvimento harmônico e sustentável da área urbana, já que se terá um conhecimento profundo da área e de suas dinâmicas.

## 2.9. Modelo Digital de Terreno

A representação numérica de uma superfície vem se tornando comum na geografia, geomorfologia, mapeamento de riscos, geofísica, entre outros. A combinação de ciência da

terra com ciência da computação e engenharia, trata tanto das formas de terrenos específicas, como de paisagens contínuas (PIKE, 2000). O modelo digital de terreno (MDT) é um dado computacional que representa numericamente uma superfície topográfica que é utilizada como base para a geração dos parâmetros morfométricos, como: declividade, aspecto, fluxo acumulado, entre outros (OLAYA, 2009).

O MDT pode ser obtido por meio de interpolação de dados topográficos, como pontos cotados e curvas de nível. Existem vários métodos de interpolação para a geração de MDTs dentre eles o de malha triangular conhecido como TIN (*Triangular Irregular Network*), onde triângulos de tamanhos variados representam a superfície, esse método apresenta bons resultados em relevos mais movimentados, com variações locais mais acentuadas (FELGUEIRAS, 2001; HENGL & EVANS, 2009). Outra forma de representação do terreno é por meio da grade regular, onde a superfície é representada por células (*pixels*) e cada uma tem um valor único de altitude. Dentre os interpoladores de grade regular os mais conhecidos são o Inverso do Quadrado da Distância (IDW), Kriging, ANUDEM (Topogrid / Topo to Raster), entre outros (HENGL & EVANS, 2009).

A grade regular tem se tornado o padrão dominante para os MDTs, por ser compatível com os dados de sensoriamento remoto e simplificar as análises baseadas no terreno (HUTCHINSON; XU & STEIN, 2011).

O ANUDEM, desenvolvido por Hutchinson (1988; 1989), combina a interpolação local, como o utilizado no inverso do quadrado da distância, com a interpolação global, como o interpolador *kriging* (WAHBA *apud* ESRI, 1993). Ele se destaca em estudos voltados para a hidrologia, pois, permite a utilização da rede de drenagem e/ou corpos d'água no processo de interpolação, o que resulta em um considerável aumento da precisão do dado gerado (ESRI, 1993). A partir da interpolação obtida por este método é gerada uma estrutura de drenagem hipotética, onde as depressões que não estão de acordo com o fluxo gravitacional são removidas, além disso, é possível a utilização da rede de drenagem. Esse interpolador foi implementado pela ESRI no ArcGIS com o nome de Topogrid, no software ArcInfo Workstation 7.x e que passou a se chamar Topo to Raster do software ArcGIS 9.x.

## **2.10. Modelagem Hidrológica**

O modelo hidrológico é uma representação matemática do comportamento do fluxo de água e seus constituintes sobre uma determinada parte da superfície e/ou subsuperfície do solo (O'Loughlin, 1986). De uma maneira geral, os modelos hidrológicos descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por evapotranspiração, o movimento da água no solo causado pela infiltração, percolação e o escoamento tanto superficial quanto subsuperficial, bem como nos canais de escoamento.

Um dos pioneiros na utilização de metodologias de modelagem matemática para a representação do mundo real a partir de parâmetros físicos da natureza foram Beven & Kirkby (1979), que desenvolveram um modelo que pudesse servir na determinação das regiões que apresentam solos saturados após uma determinada quantidade pluviométrica. O padrão de saturação segundo esses autores está diretamente relacionado com a razão  $(a/b)/M$ , ou seja, com a área drenada que passa por uma unidade de comprimento de contorno  $a/b$  dividida pela declividade  $M$ .

O'Loughlin (1986), objetivando também a definição de áreas de saturação na paisagem para uma determinada quantidade de chuva, desenvolveu um modelo hidrológico (TOPOG) a partir da análise da área de contribuição a montante, da transmissividade do solo e da declividade local (Figura 2.2).

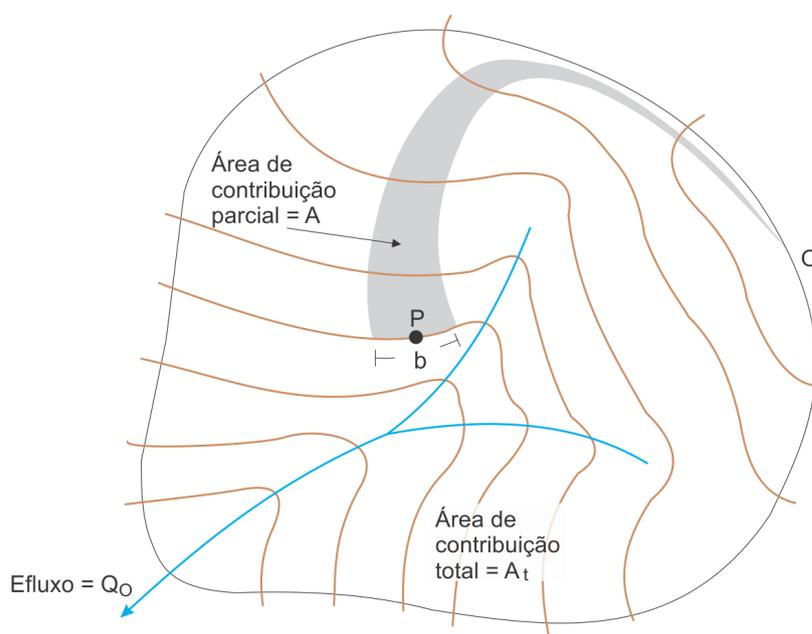


Figura 2.2 – A bacia referente ao ponto P está representada pela área cinza. Esta área é denominada área de contribuição parcial (Modificado de O’Loughlin, 1986).

O modelo de O’Loughlin identifica as zonas de saturação na paisagem quando o produto entre a área drenada ( $a$ ) e a precipitação ( $Q$ ) que passa por um elemento de contorno de comprimento ( $b$ ), seja maior que o produto da transmissividade do solo ( $T$ ) e o seno da declividade local ( $\theta$ ) (Equação 1)

$$a.Q/b \geq T.\text{sen}\theta \quad (1)$$

A Figura 2.3 demonstra de forma esquemática a proposta de O'Loughlin (1986), onde polígonos irregulares representam graficamente o terreno, esses polígonos são obtidos a partir da interseção das curvas de nível com as linhas de gradiente máximo, onde a área de contribuição (a) de uma determinada célula é representada pela área mais escura.

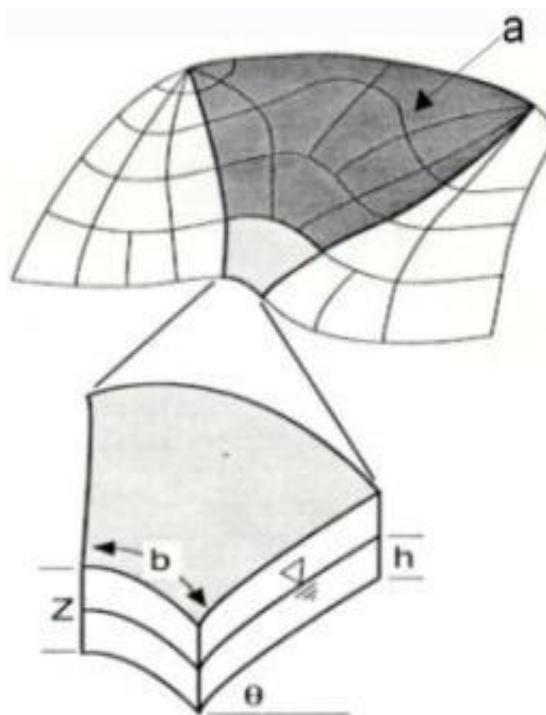


Figura 2.3 - Representação do modelo hidrológico desenvolvido por O'Loughlin (1986). (modificado de MONTGOMERY & DIETRICH, 1994).

Dietrich *et al.* (1993), aprimoraram o modelo de O'Loughlin utilizando-o como base para estudos de previsão de zonas de saturação em áreas que apresentam intensos processos erosivos.

### 2.10.1. Obtenção de mapas de fluxo acumulado

Um dos dados fundamentais nos modelos hidrológicos é o mapa de fluxo acumulado, que simula a dinâmica do escoamento superficial. Com isso, é possível identificar em quais locais do terreno o fluxo tende a acumular e de onde ele vem.

Três métodos destacam-se para a obtenção do fluxo acumulado (GRUBER & PECKHAM, 2009): o método D8 (O'CALLAGHAN & MARK, 1984), por ser um dos métodos mais utilizados em aplicativos de SIG e que atende boa parte das aplicações onde é utilizado; o método proposto por Quinn *et al.* (1991), no qual apresenta bons resultados por ser um método bem flexível, mas que a variável que permite essa flexibilidade também torna difícil sua utilização devido a necessidade de determinar seus valores ótimos; Método D-Inf (TARBOTON, 1997) que é de fácil utilização e apresenta bons resultados na obtenção do

mapa de fluxo acumulado. Abaixo estão apresentadas as metodologias destes três métodos.

O'Callaghan & Mark (1984) propuseram o método D8 para a geração de mapa de fluxo acumulado, onde, em uma área de 3 x 3 *pixels* o fluxo correspondente ao pixel central é destinado a um dos oito *pixels* vizinhos, de acordo com o valor de menor altimetria (Figura 2.4). De acordo com Ramos *et al.* (2003) e Erskine *et al.*(2006), este método apresenta algumas limitações quando comparado com outro de distribuição proporcional.

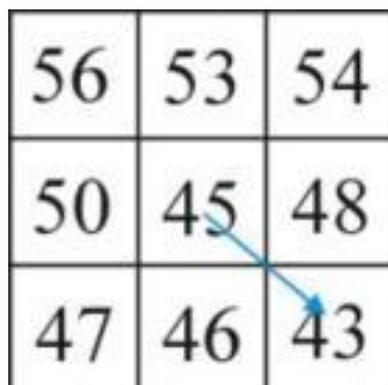


Figura 2.4 – Representação esquemática da distribuição de fluxo no método D8 de acordo com os valores de declividade dos pixels vizinhos.

Quinn *et al.* (1991) desenvolveram uma metodologia em que a área de contribuição é determinada de acordo com a distribuição proporcional do fluxo, onde a fração do fluxo transferida para cada célula a jusante da célula central é proporcional ao produto da distância medida e a um fator de peso geométrico, que depende da direção. Assim com essa metodologia é possível obter os mesmos resultados, independente da orientação relativa da topografia em relação à grade.

No método D-Inf ( $D^\infty$ ) a representação da área de contribuição é dada de forma proporcional (TARBOTON, 1997). Esse método simula o comportamento do fluxo em uma área já saturada e é uma evolução do método D8 introduzido por O'Callaghan & Mark (1984), onde o fluxo é distribuído para apenas um dos oito *pixels* vizinhos, de acordo com a maior declividade do terreno, tendo a limitação de que cada uma das oito possibilidades está separada por 45°. No método  $D^\infty$  a direção do fluxo está entre os valores 0 e  $2\pi$  de uma das faces triangulares, ao todo são nove triângulos, um central e oito periféricos. Assim cada triângulo compreende parte de três *pixels*, e o *pixel* base (**i**, **j**) pode distribuir o fluxo para outros dois, sendo que a proporção que vai para cada um é dada pelo ângulo ( **$\alpha$** ) do vetor em relação ao lado do triângulo, que está posicionado no *pixel* vizinho, dividido por ( **$\alpha_1 + \alpha_2$** ) (Figura 2.5).

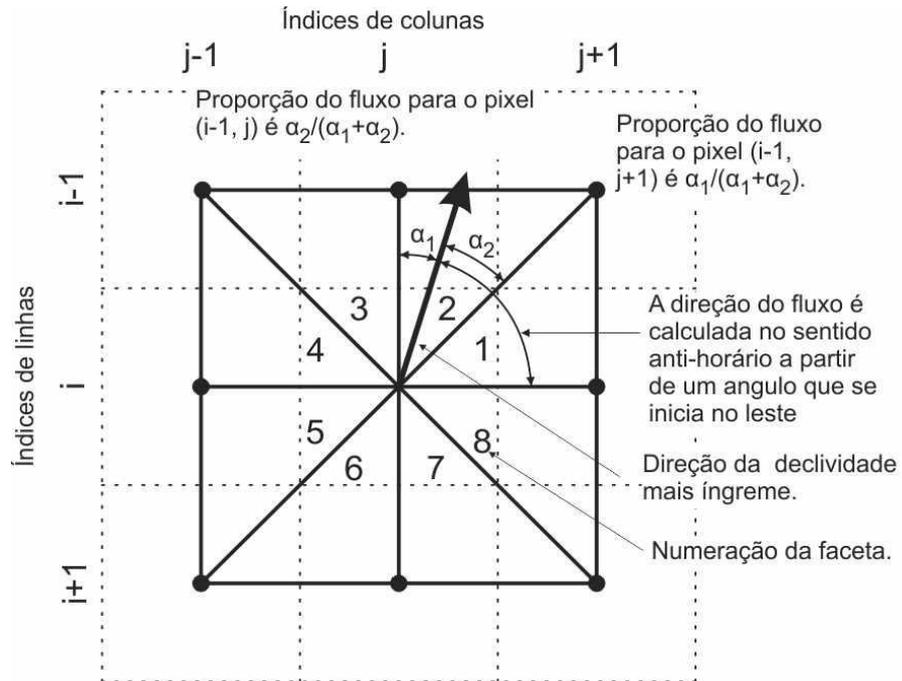


Figura 2.5 – Representação do método  $D^\infty$ , onde o fluxo assume uma determinada direção de acordo com a maior declividade. (Modificado de TARBOTON, 1997).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL

O Distrito Federal está localizado no Planalto Central, entre os paralelos 15°30'S (ao norte) e 16°03'S (ao sul) e dois rios, o Descoberto (a oeste) e o Preto (a leste) totalizando uma área de 578.918,96 ha (Figura 3.1). A altitude média é de 1.100 metros acima do nível do mar, apresentando os extremos na parte norte, com vales partindo de 725 m e com o ponto mais alto do DF passando dos 1340 m.



Figura 3.1 – Localização do Distrito Federal

#### 3.1. Histórico de ocupação

No início da construção da nova capital, além de alguns poucos núcleos urbanos as demais localidades eram acampamentos e favelas que foram remanejadas dando origem a algumas Cidades-Satélites (PAVIANI, 2007). O crescimento da população no DF apresenta uma média de 485.683,60 habitantes por década, segundo os dados do Censo disponibilizado pelo IBGE e que tem o primeiro registro em 1960. A Tabela 3.1 apresenta os dados do Censo elaborado pelo IBGE.

O crescimento da população trouxe consigo a necessidade de moradia e com isso, políticas de criação de cidades para assentar pessoas de baixa renda foram se espalhando pelo território do DF, como pode ser visto na dinâmica das criações das Regiões

Administrativas – RAs, que são divisões administrativas do Governo local, criadas pela Lei Federal 4.545/64 e que dividia o território do DF em 8 RAs. Desde então o número de RAs passou para 12 em 1989, 15 em 1993, 19 em 1994, 24 (2003), 27 (2004), 29 (2005) e finalmente em 2009 foi criada a última RA, completando 30 (CODEPLAN, 2010).

Tabela 3.1 – População do Distrito Federal nos Censos Demográficos por situação do domicílio.

Ano						
1950	1960	1970	1980	1991	2000	2010
-	141.742,00	546.015,00	1.203.333,00	1.598.415,00	2.043.169,00	2.570.160,00
Fonte: IBGE - Censo Demográfico						

Estas expansões das áreas urbanas foram feitas, muitas vezes, sem os devidos cuidados com as obras de infra-estrutura, até porque muitas se iniciaram como “favelas”, onde nem asfalto existia e os casebres se multiplicavam. Com o passar do tempo essas áreas foram se consolidando, o asfalto foi aparecendo e as casas mudando de padrão. Hoje o Distrito Federal apresenta uma mancha urbana quase contínua.

### 3.2. Vegetação

O DF está totalmente inserido no Bioma Cerrado e a vegetação é composta por diversas fitofisionomias características do bioma, apresentando áreas de Cerradão, Cerrado (*stricto sensu*), Campos (limpo e sujo) e Matas Ciliares e de Galeria.

De acordo com Eiten (1990) e Condé (1999) as fitofisionomias do Cerrado (*sensu lato*) são características de vegetação de interflúvio e se apresentam como:

**Cerrado (*sensu strictu*):** vegetação predominante do Distrito Federal, que tem como características em sua formação a presença de uma camada lenhosa descontínua, onde ocorrem árvores de até oito metros de altura ou arbustos permanentes, palmeiras caudalescentes, cipós e camada rasteira de ervas, semi-arbustos e arbustos recorrentes de caule fino.

**Cerradão:** comunidade de Cerrado com árvores de mais de sete metros de altura. Sua constituição é dada por dossel alto e fechado com a presença de uma camada densa de arbustos e arvoretas.

**Campo Cerrado:** vegetação transicional do cerrado para o campo sujo, fisionomicamente é diferente do cerrado devido a ocorrência de árvores de menor porte e

mais espaçadas. Devido a baixa densidade das árvores de maior porte ocorre com maior quantidade as ervas, principalmente as gramíneas, e semi-arbustos e arbustos recorrentes.

Campo Sujo de Cerrado: apresenta uma camada lenhosa descontínua de arbustos permanentes, chegando a um metro e vinte de altura, e uma camada constituída por ervas, semi-arbustos, e arbustos recorrentes de caule fino. Podem ocorrer árvores de pequeno porte de forma espaçada. A densidade da camada rasteira e dos arbustos em comparação ao campo cerrado é maior.

Campo Limpo de Cerrado: apresenta vegetação, predominantemente, rasteira de ervas e semi-arbustos, com composição florística quase idêntica a da camada rasteira dos campos sujos de cerrado e campos cerrado da mesma região.

Além das fitofisionomias de cerrado (*sensu lato*) são encontrados no Distrito Federal outros tipos de vegetação característico de interflúvio:

Floresta mesofítica sobre latossolo: aparece em dois locais do Distrito Federal, na área da Escola de Administração Fazendária e Jardim Botânico; e na região da APA do Cafuringa, ao norte do Distrito Federal. A característica principal desse tipo de vegetação é o solo em que ocorre (latossolos eutóficos) e sua densidade e porte, que de acordo com FZB-DF (*apud* CONDÉ, 1999) chega a 2400 indivíduos/ha e dossel com altura entre 10 e 20 metros com alguns emergentes atingindo 30 metros.

Floresta mesofítica (ou arboredo) sobre calcários: vegetação associada aos afloramentos calcários, dolomitos e suas circunvizinhança. Apresentam áreas mais amplas de abrangência, quando comparada à floresta mesofítica sobre latossolos, e ocorre na APA do Cafuringa na parte norte do DF.

O Cerrado apresenta também outros tipos de vegetação que aparecem nas regiões de vales, apresentando os seguintes tipos de vegetação associados aos cursos d'água (EITEN, 1990):

- Floresta de Galeria e Florestas de Encosta associadas: ocorre no fundo dos vales, onde há disponibilidade de água para que a vegetação possa suprir todas as folhas durante o ano. O terreno pode ser bem drenado ou pantanoso. Na verdade as florestas de galeria são enclaves florestais no domínio dos cerrados, com espécies endêmicas, espécies da mata Atlântica, da floresta Amazônica, matas da bacia do rio Paraná e espécies típicas do cerrado e matas mesofíticas do Brasil Central (SILVA JR. & FELFILI, 1996)

- Biritizais e Veredas: apresenta um tipo de vegetação composta que são comuns ao longo dos fundos de vales, dominado por espécies adaptadas aos solos alagados. Na borda ocorre um campo úmido sazonalmente saturado. E no centro das veredas ocorre um brejo gramíneo permanente e na sua porção central a presença de buritis associados ou não a algumas árvores e arbustos.
- Campo Úmido: é como são designados os campos limpos que ficam encharcados por longos períodos na estação chuvosa. Geralmente forma uma faixa que margeia os dois lados de uma Floresta de Galeria ou Vereda, estabelecendo a separação entre estas e o Cerrado no interflúvio. Quando há ocorrência de morrotes no campo úmido esse passa a se chamar campo de murunduns, sendo que nestes, ao contrário da vegetação no campo úmido, ocorrem espécies arbóreas dos cerrados próximos.

### 3.3. Clima

O Clima no Distrito Federal é marcado por dois períodos, um seco, que geralmente se apresenta de maio a agosto; e outro úmido que vai de abril a setembro. As temperaturas mais altas ficam na média dos 26°C e as mais baixas, entre 10°C e 12°C (BRASIL, 2003). No período seco a umidade relativa do ar chega a alcançar os 10%.

A média pluviométrica anual no DF (entre os anos de 1972 e 1992) é de aproximadamente 1.405mm, sendo que a maior parte das chuvas se concentra em novembro, dezembro e janeiro, onde as médias mensais ficam acima dos 200mm. Em abril e outubro a média cai para 130mm e nos meses entre maio e setembro não passa dos 60mm (BRASIL, 2003). As precipitações, no período chuvoso, geralmente ocorrem em formato de pancadas, podendo em um único dia chover o previsto para uma semana.

Segundo CODEPLAN (1984), tanto as áreas mais elevadas quanto as menos elevadas apresentam valores de precipitação semelhantes, Desta forma, a classificação climática é baseada, principalmente, nas variações de temperatura que estão relacionadas a determinadas faixas de altitude. Assim, de acordo com a classificação de Köppen, as chapadas mais elevadas, acima dos 1200m têm como típico o clima tropical de altitude (Cwb), onde, nos meses mais frios a temperatura fica abaixo dos 18°C, já nos meses mais quentes a temperatura média é inferior aos 22°C. Na região do pediplano de Brasília, entre as cotas 1000m e 1200m ocorre o clima tropical de altitude (Cwa) onde o que diferencia dos anteriores é que as temperaturas médias do mês mais quente são superiores a 22°C. As áreas abaixo da cota de 1000m apresentam o clima tropical (Aw) e a temperatura média é superior a 18°C durante todo ano.

### 3.4. Geologia

Segundo Freitas-Silva & Campos (1999) o Distrito Federal encontra-se na região central de Dobramentos e Cavalgamentos da Faixa Brasília e sua transição entre as porções interna e externa, onde, importantes sistemas de falhas (empurrões e cavalgamentos) fazem a superposição das unidades regionais.

A geologia do Distrito Federal é composta por quatro grupos litológicos reconhecidos (Figura 3.2): Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, respectivamente contribuindo com cerca de 65; 15; 5 e 15% de sua área total, compostas por rochas metassedimentares (Figura 3.3) (Freitas-Silva & Campos, 1999).

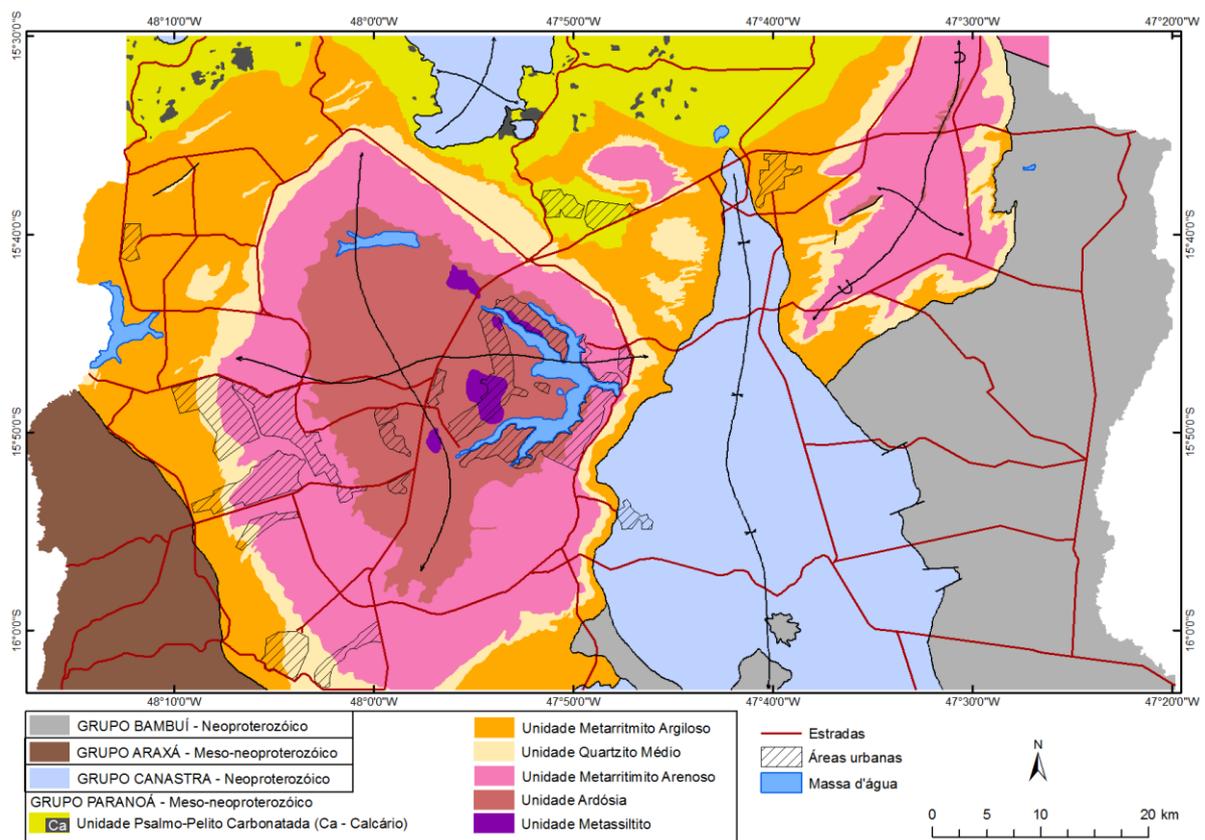


Figura 3.2 – Mapa Geológico simplificado do DF (modificado de FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1999).

De acordo com Freitas-Silva & Campos (1999), em decorrência de trabalhos de âmbitos regionais, há uma diferença significativa entre a estratigrafia apresentada em seu trabalho, daquela considerada nos trabalhos anteriores, pois inclui o Grupo Araxá no extremo sudoeste e o Grupo Bambuí na borda leste do Distrito Federal, além de tentar refinar o empilhamento estratigráfico formal do Grupo Paranoá. Segundo Rezende *et al.*

(2000) existem diversos trabalhos que evidenciam as dificuldades de separação entre o Grupo Araxá do Grupo Canastra devido ao caráter transicional entre os mesmos, mas que refletem condições diferentes de sedimentação na bacia.

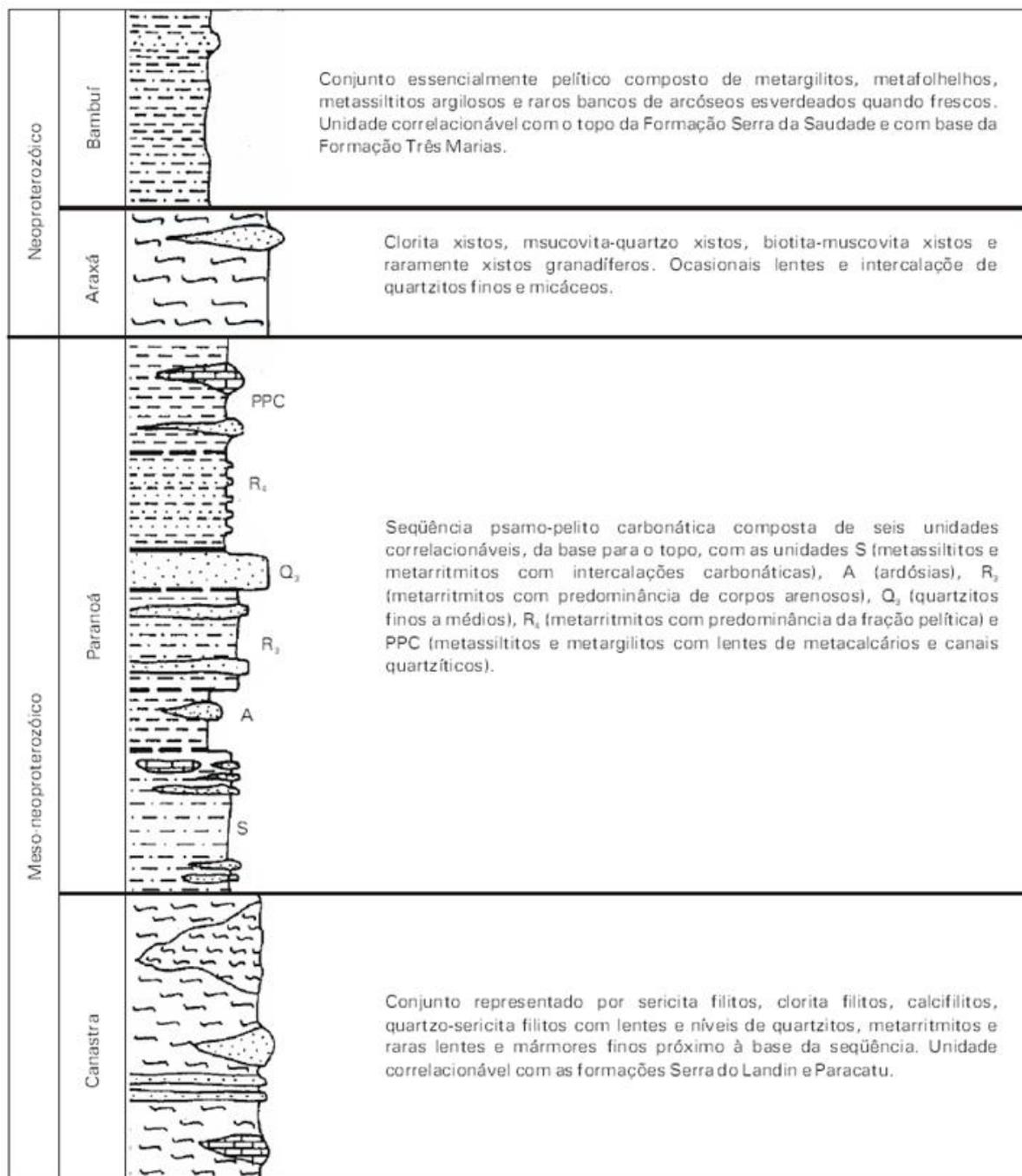


Figura 3.3 – Coluna estratigráfica do Distrito Federal com a possível ordem de deposição, mas que atualmente apresentam inversões e complicações em função dos sistemas de cavalgamentos (FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1999).

### 3.4.1. Grupo Paranoá.

Segundo Faria *apud* Freitas-Silva & Campos (1999) o grupo Paranoá, de idade Meso-neoproterozóica, é composto por rochas metapsamo-pelíticas e carbonatadas, sendo que no Distrito Federal ocorrem em seis unidades correlacionáveis da base para o topo (S, A, R3, Q3, R4 e PC), onde:

- Unidade S: é o pacote que apresenta maior variabilidade, podendo alcançar espessuras superiores a 500 metros. É subdividido em cinco litofácies, sendo um conjunto de metassiltitos esverdeados homogêneos que podem conter intercalações arenosas compondo metarritmitos ou lentes de calcários e dolomitos (estas últimas bastante raras). O topo deste conjunto geralmente é representado por um metarritmito pelítico a arenoso onde bancos decimétricos de quartzitos e metassiltitos intercalam-se aos metassiltitos argilosos.
- Unidade A: apresenta contato transicional a partir da unidade anterior, sendo constituída por ardósias homogêneas de cor cinza esverdeada, que passam a tons vermelhos característicos com a alteração intempérica. Neste conjunto, são observadas duas foliações penetrativas que representam clivagens ardosianas. Sua espessura é de difícil estimativa em virtude do intenso dobramento, sendo considerada da ordem de 70 metros.
- Unidade R3: corresponde a um metarritmito arenoso, caracterizado por intercalações de bancos decimétricos a métricos de quartzitos e materiais pelíticos (compostos por metassiltitos e ardósias). Localmente são observados pacotes de até 10 metros de espessura que destacam do conjunto rítmico. A espessura total deste conjunto pode alcançar 90 metros.
- Unidade Q3: composta por quartzitos brancos, finos, bastante silicificados, ricos em estratificações cruzadas tabulares, acanaladas e do tipo espinha de peixe, além de marcas onduladas assimétricas. A máxima espessura de 70 metros foi estimada na região de São João D'Aliança.
- Unidade R4: metarritmito argiloso, composto por intercalações de materiais sílticos e argilosos além de delgados estratos de quartzitos finos rosados a avermelhados. Os níveis arenosos apresentam estruturas do tipo laminações cruzadas, laminações truncadas por ondas e hummockys. Esta unidade apresenta espessuras variando de 100 a 150 metros.
- Unidade PC: predominantemente pelítica com ardósias cinzas e metassiltitos argilosos associados com lentes de mármore finos que podem conter estruturas algais do tipo estromatólitos colunares e cônicos. São comuns os níveis decimétricos a métricos, lenticulares ou não, de quartzitos médios, grossos e até conglomeráticos, apresentando tonalidades escuras. Sua espessura varia de 120 a 150 metros. (FARIA *apud* FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1999, p. 41-43)

### 3.4.2. Grupo Canastra

Com idade Meso-neoproterozóica, e subdividido em três formações: Serra do Landim, Paracatu, e Serra dos Pilões, sendo que a Formação Paracatu é composta por dois membros: Morro do Ouro e Serra da Anta (FREITAS-SILVA & DARDENNE *apud* FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1999). No Distrito Federal é constituído, principalmente, por clorita e

sericita filitos e subordinadamente calcifilitos, filitos carbonosos, quartzitos e mármore finos, correlacionáveis com as formações Serra do Landin e Paracatu (MARTINS *et al.*, 2004).

### **3.4.3. Grupo Araxá**

Datado como Neoproterozóico (PIMENTEL *et al. apud* MARTINS *et al.*, 2004), é representado no Distrito Federal por muscovita xistos, clorita-quatzos xistos, muscovita-granada xistos e raras lentes de quartzitos micáceos.

### **3.4.4. Grupo Bambuí**

De idade Neoproterozóica é constituído pela sequência pelito-carbonatada-arcoseana, dividida da base para o topo nas formações Jequitaí, Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. No Distrito Federal são representados por metassiltitos argilosos, metargilitos e raras intercalações de arcóseos, correlacionados ao topo da Formação Serra da Saudade e à base da Formação Três Marias (DARDENNE *apud* MARTINS *et al.*, 2004).

## **3.5. Solos**

Os solos do Distrito Federal apresentam três classes mais importantes (Figura 3.4), que cobrem cerca de 85,49% do território, o Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e o Cambissolo (C). Destes os Latossolos representam 54,47% da área sendo divididos em LV (38,63%) e LVA (15,84%). O LV ocorre principalmente nos topos das chapadas, principais divisores com topos planos, na depressão do Paranoá e na Bacia do Rio Preto. A classe LVA ocorre nas bordas de chapada e divisores, em superfícies planas, abaixo dos topos da Chapada da Contagem, sempre adjacente a classe LV (MARTINS *et al.*, 2004).

A classe Cambissolo aparece em 31,02% do território, ocorrendo nas vertentes das bacias do Maranhão, do Descoberto e do São Bartolomeu, também ocorrem nas encostas com declividades mais elevadas na depressão do Paranoá e na Bacia do Rio Preto (MARTINS *et al.*, 2004).

As outras classes que representam 9,06% dos solos (MARTINS *et al.*, 2004) são compostas por Argissolos (4,09%); Nitossolos (0,09%); Neossolos Flúvicos (0,19%); Gleissolos (4,16%); Neossolos Quartzarênicos (0,53%). As áreas urbanas e de superfícies aquáticas somam (5,45%).

As classes de solos presentes no Distrito Federal possuem a seguinte descrição:

O Latossolo Vermelho (LV): solos de composição mineral, apresentam horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte diagnóstico superficial,

exceto hístico. São bastante intemperizados e evoluídos. Apresentam boa drenagem, variando de fortemente a bem drenados, entretanto podem ocorrer solos de cor pálida e com drenagem ineficiente com certo grau de gleização. Apresentam na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA), cores com matiz 2,5YR ou mais vermelho (EMBRAPA, 2006). Estão sempre associados ao relevo que varia de plano a suave ondulado, com altitudes variando entre 850 a 1250 metros, sobre as rochas do grupo Paranoá. A vegetação associada é de floresta subcaducifólia, Cerradão e Cerrado subcaducifílo e Campo Cerrado (EMBRAPA, 1978).

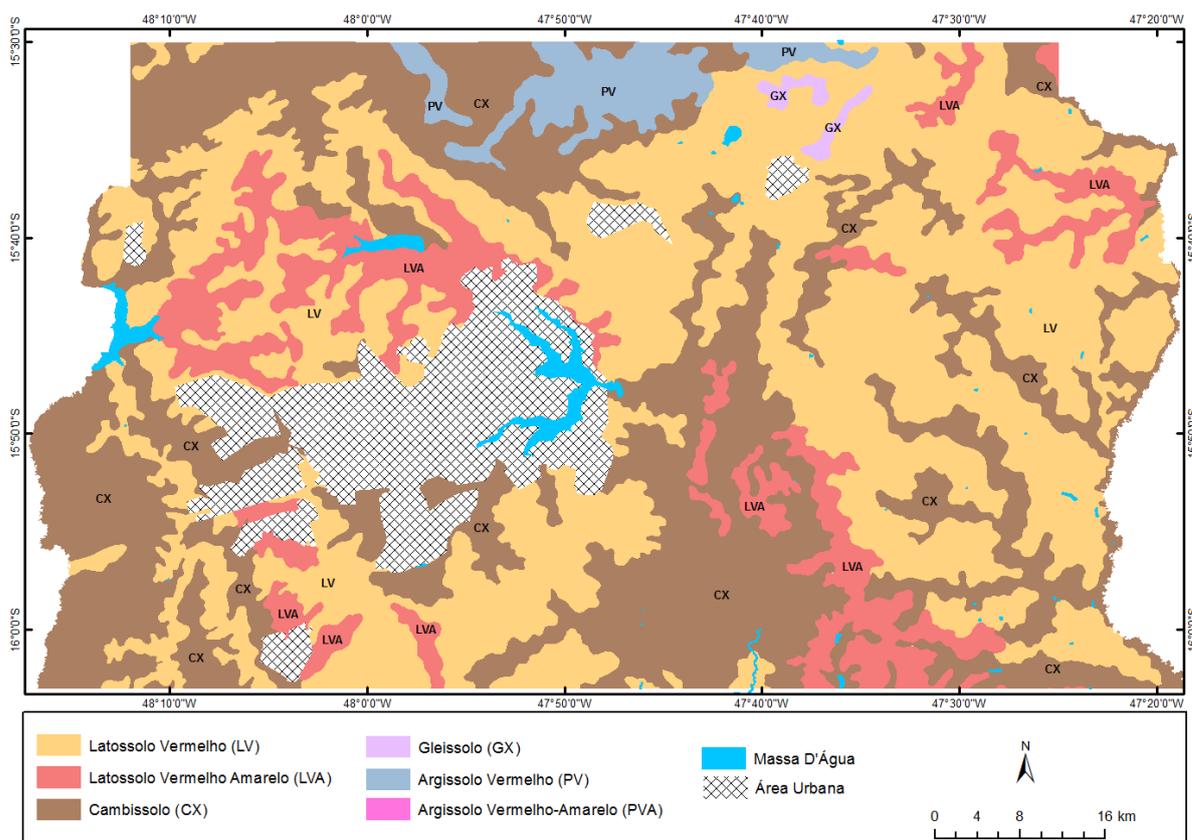


Figura 3.4 – Mapa simplificado das Classes de Solos do Distrito Federal (Modificado de BRASIL, 2003)

Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA): solos de composição mineral com horizonte A moderado, horizonte B latossólico, distróficos ou álicos. Apresentam textura argilosa ou média e grande profundidade, vão de bem a fortemente denados. As cores variam do vermelho ao amarelo de matiz 2,5YR ou mais amarelada, podendo em alguns perfis apresentar caráter concrecionário e petroplíntico. A vegetação associada é composta por Floresta, Cerrado, Campo Cerrado vegetação campestre. Ocorrem nas altitudes entre 850 e 1350 metros. Esses solos apresentam pequena suscetibilidade a erosão, exceto em locais onde o volume do escoamento de águas pluviais é muito forte (EMBRAPA, 1978).

Cambissolo (C): classe que compreende solos minerais, de pouco desenvolvimento. Apresentam horizonte B incipiente subjacente a qualquer dos casos, desde que não atendam os requisitos para se enquadrarem nos Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos e Organossolos. A sequência dos horizontes é A ou hístico, Bi, C, com ou sem R (EMBRAPA, 2006). A coloração no horizonte A é bruno-avermelhada-escura, bruno-acizentada-escura e bruno-escura, apresentando matizes que variam de 5YR a 10YR. Já no horizonte B a coloração é bruno-avermelhada, bruno-amarelada ou vermelha, a matiz varia de 2,5YR a 10YR. A ocorrência desta classe de solos se dá nas vertentes que variam de suave ondulado até montanhoso em altitudes que variam de 800 a 1150 metros. Associados a tipos de vegetação variada, como: Floresta subcaducifólia, Cerradão subcaducifólio, Campo Cerrado e Campestre. Apresentam alta suscetibilidade a erosão, geralmente (EMBRAPA, 1978).

Argissolo Vermelho Amarelo (PVA): solo mineral que apresenta horizonte B textural (Bt) de argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. O horizonte Bt ocorre imediatamente abaixo do horizonte superficial, exceto quando hístico ou apresentar os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes dos Luvisolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos (EMBRAPA, 2006). Essa Classe é constituída por solos bem drenados, moderadamente porosos, principalmente na porção superficial, e que apresentam textura argilosa e média. Essas características, associadas ao relevo movimentado, tornam esses solos com alta suscetibilidade a erosão (EMBRAPA, 1978). A matiz de cor dessa classe pode alternar entre vermelho-amarelada e amarelo avermelhada, desde que não se enquadrem nas outras classes de Argissolo (EMBRAPA, 2006).

Argissolo Vermelho (PV): de acordo com Martins *et al.* (2004) essa classe de solo se encontra, em toposequências, de forma intermediária entre a classe C no topo e a PVA na base. Podem ocorrer associações locais com as classes Nitossolos Vermelhos (NV) e Chernossolos Argilúvico (MT), tanto com o PV quanto com o PVA.

A classe apresenta, na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, matiz 2,5YR ou mais vermelho ou matiz 5YR com valores e cromas iguais ou menores que 4 (EMBRAPA, 2006).

Solos Hidromórficos (G): os solos hidromórficos compreendem as classes Plintossolo e Gleissolo. São caracterizados por apresentar horizonte A bem desenvolvido e devido a alta quantidade de água e má drenagem apresentam processos de redução de ferro (Fe). Solos associados ao afloramento do lençol freático, ocorrendo em torno dos cursos d'água.

Geralmente o relevo vai de plano a suave ondulado e a vegetação característica é a Mata de Galeria (EMBRAPA, 1978).

Neossolo Flúvico (RU): desenvolvido sobre sedimentos aluviais associados às planícies das principais bacias da região (EMBRAPA, 1978), apresenta horizonte A bem desenvolvido e granulometria arenosa. A vegetação associada é de Mata de Galeria e Ciliar, com relevo plano (MARTINS *et al.*, 2004).

Neossolo Quartzarênico (RQ): Solo com origem na decomposição dos quartzitos do Grupo Paranoá. Sua ocorrência se dá nos compartimentos de Rebordo e se diferencia dos latossolos pela textura que é de areia franca a areia. Devido a estrutura fraca esse solo é bastante suscetível a erosão (EMBRAPA, 1978).

### **3.6. Geomorfologia**

#### **3.6.1. Evolução geomorfológica do Distrito Federal**

Vários autores já publicaram propostas da evolução geomorfológica do Distrito Federal, que de acordo com Martins *et al.* (2004), ainda tem algumas questões a se discutir, como o processo que modelou o relevo que se apresenta atualmente.

Segundo Martins *et al.* (2004), a maioria dos autores afirma que o processo de pediplanação foi o responsável pela formação da superfície Sul-americana, porém as condições climatológicas no período não são condizentes com essa teoria, que tem mais correlação com o processo de etchiplanação. Isso porque o processo de pediplanação é resultante de climas áridos ou semiáridos.

Contudo, as condições climáticas no período de formação dessas superfícies, entre o Cretáceo Superior e o Mioceno Inferior (BRAUN *apud* MARTINS, *et al.*, 2004), era úmido e quente (FRAKES *apud* MARTINS *et al.*, 2004), condições favoráveis ao processo de etchiplanação, e que ao apresentar períodos de intercalação com processos de soerguimento e/ou de clima seco, denudaram parcial ou totalmente o regolito, produzido pelo processo de etchiplanação, aflorando níveis do regolito, ou a superfície basal de intemperismo (MARTINS *et al.*, 2004).

Outra evidência do modelo de etchiplanação, pode ser encontrada nos estudos de geologia dos regolitos lateríticos, que usando outra terminologia apontam para o mesmo processo de evolução pedogeomorfológica (MARTINS *et al.*, 2004).

Martins *et al.* (2004) apresenta seu modelo de evolução geomorfológica da região do Distrito Federal e que está baseado no modelo de evolução pedogeomorfológica, constituído pelas seguintes etapas:

**1. Formação de superfícies desniveladas** (Superfície Pós-Gondwana, Cretáceo médio a Superior) – processos de denudação física diferencial em clima árido associado a soerguimento regional. Formação de superfície com baixa declividade e parcialmente dissecada. Condicionamento litoestrutural atuante. Domos estruturais em posições mais elevadas e bacias estruturais em posições mais baixas. Materiais derivados de quartzitos e metarritmitos preservados em posições mais elevadas. Materiais derivados de ardósias e filitos posicionados em elevações menores.

**2. Geração de regolitos lateríticos complexos** (Superfície Sul-americana, Paleoceno a Mioceno Inferior) – Processos de intemperismo químico em condições úmidas e quentes. Diferenciação de regolitos lateríticos complexos abaixo da superfície desnivelada inicial. Formação de couraça maciça por acumulação de hematita nas porções medianas dos regolitos, entre o saprólito e o *solum*, pelo mecanismo de depressão hídrica.

**3. Denudação dos regolitos lateríticos** (mioceno Inferior) – Soerguimento e mudança para condições climáticas mais secas. Processos de intemperismo físico diferencial. Aprofundamento do nível de base e dissecção da superfície Sul-americana. Nos resíduos dessa superfície, denudação do topo dos regolitos, aflorando os níveis de couraças.

**4. Formação de novo conjunto de fácies lateríticas** (Mioceno Médio a Plioceno) – Processos de intemperismo químico em condições climáticas úmidas e quentes. Aprofundamento do saprólito. Degradação das couraças maciças no interior das chapadas em condições hidratadas e elevada atividade biológica, formando couraças de diversos tipos morfológicos e *solum*. Processos de dissolução de minerais mais desidratados, hematita e caulinita e cristalização de minerais mais hidratados, goethita e gibbsita.

**5. Dissecção das superfícies residuais e sedimentação** (Plioceno Superior) – Soerguimento e mudanças para condições climáticas mais secas. Processos de intemperismo físico diferencial. Dissecção das superfícies residuais. Formação de calhas por erosão linear. Sedimentação no interior das calhas em eventos pluviométricos torrenciais.

**6. Alternância de domínio entre processos erosivos e pedogenéticos** (Quaternário) – Várias oscilações climáticas curtas, entre o seco e úmido. Durante os ciclos secos, maior atividade erosiva e aumento do recuo das vertentes de maior declividade. Durante os ciclos úmidos, maior atividade química e pedogênese. Aprofundamento do saprólito grosso. Atualmente, as sequências de solos estão em equilíbrio com as condições climáticas. (MARTINS *et al.*, 2004, p. 46-48)

### 3.6.2. Unidades Geomorfológicas

Novaes Pinto (1990) identifica três tipos de macrounidades geomorfológicas no Distrito Federal, essas foram subdivididas em treze unidades geomorfológicas, tendo como parâmetros as características locais e as relações altimétricas.

As macrounidades geomorfológicas são Região de Chapada, Área de Dissecção Intermediária e Região Dissecada de Vales e que se subdividem em unidades conforme apresentado abaixo e disposto na Figura 3.5:

- Região de Chapada – apresenta topografia plana e plano ondulada, situada nas áreas acima da cota de 1.000 m, apresentando cobertura de latossolos e de laterita

(vesicular e pisolítica) e de seguimentos retilíneos nas encostas. Ocupa 1.968 km<sup>2</sup> (33,8% da área do Distrito Federal), e subdividi-se nas seguintes unidades:

- Chapada da Contagem, com área total de 1028 km<sup>2</sup> (17%);
  - Chapada de Brasília, com área de 202 km<sup>2</sup> (3,5%);
  - Chapada do Pipiripau, com área de 445 km<sup>2</sup> (7,7%);
  - Chapada Divisora São Bartolomeu-Preto, com área de 188 km<sup>2</sup> (3,2%)
  - Chapada Divisora Descoberto-Alagado, com área de 105 km<sup>2</sup> (1,8%)
- Área de Dissecção Intermediária – correspondem às áreas onde há ocorrência de chapada neogênica retrabalhada pelo processo de pediplanação, sem perder suas características originais, e recobertas por latossolo vermelho-escuro. Essa macrounidade ocupa 1.793 km<sup>2</sup> (30,9% do território do Distrito Federal) e está subdividida nas seguintes unidades:
    - Depressão do Paranoá, com área de 726 km<sup>2</sup> (12,5%)
    - Vale do Rio Preto, com área de 1.067 km<sup>2</sup> (18,4%)
    - Curso superior do Rio Maranhão, com área de 574 km<sup>2</sup> (9,9%)
    - Alto curso do Rio São Bartolomeu, com área de 270 km<sup>2</sup> (4,6%)
- Região dissecada de vale – área com densidade de drenagem mais elevada que as duas primeiras e se caracteriza pelas depressões de litologia de resistências variadas, ocupando 2.053 km<sup>2</sup> (35,5%) do território do Distrito Federal, subdividindo-se em:
    - Curso superior do Rio São Bartolomeu, com área de 608 km<sup>2</sup> (10,5%)
    - Alto Curso do Rio Descoberto, com área de 237 km<sup>2</sup> (4,1%)
    - Curso Superior do Rio Descoberto, com área de 270 km<sup>2</sup> (4,6%)
    - Alto Curso do Rio Alagado, com área de 94 km<sup>2</sup> (1,6%).

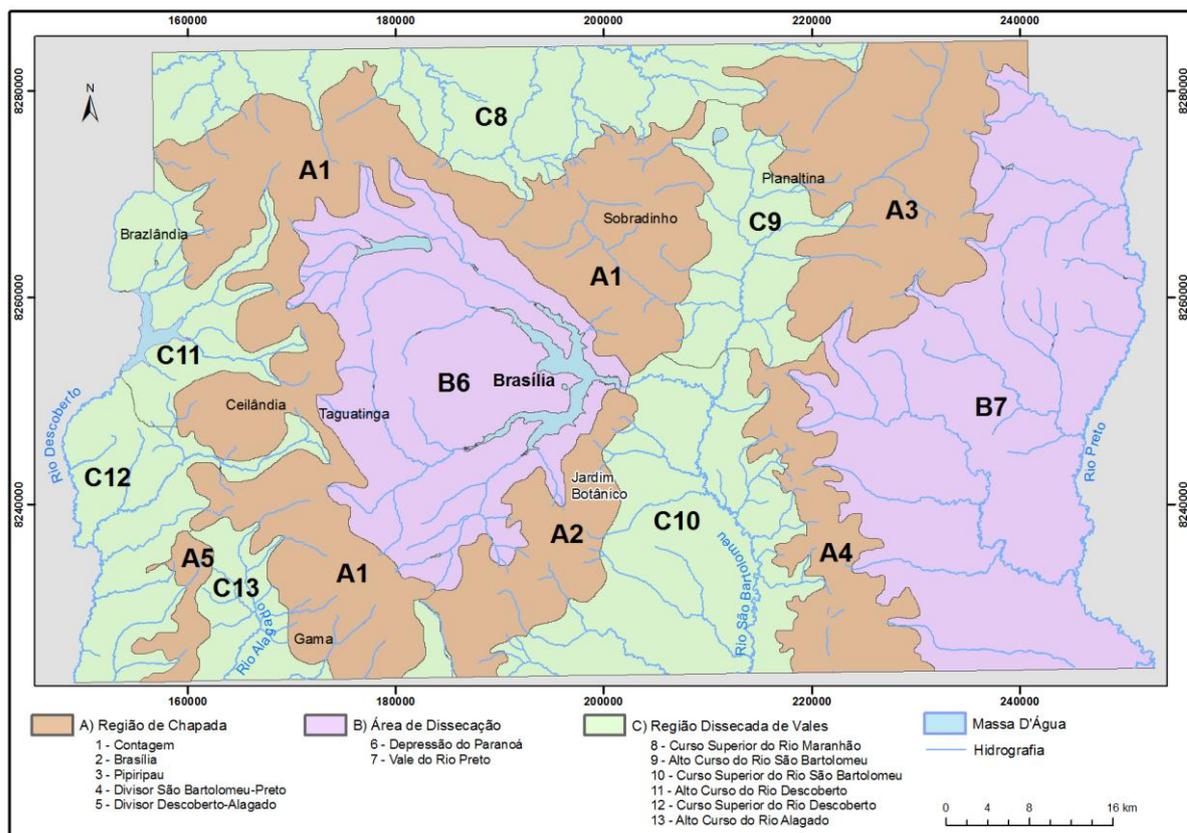


Figura 3.5 – Mapa geomorfológico do DF (Modificado de NOVAES PINTO, 1990).

### 3.7. A erosão no DF

Em trabalho realizado para subsidiar a construção de Brasília por Belcher & Associates (1956), foi identificado que a região do Distrito Federal apresenta alta suscetibilidade a ocorrência de voçorocas e que os solos, apesar de porosos, necessitam da cobertura vegetal para que a infiltração das águas pluviais possam ocorrer de forma mais eficiente e com isso minimizar o escoamento superficial. Também foi mencionada a concentração das águas pluviais, que deveria ser evitada, e nos locais onde ocorresse deveriam ser feitas obras de engenharia para dissipar estas águas.

De acordo com Mortari (1994) várias erosões se iniciaram junto com Brasília, devido à ocupação da nova capital, retirada inadequada de cascalho laterítico, cidades satélites assentadas em bordas de chapada e as condições naturais da região.

Em 2008 o Governo do Distrito Federal lançou o Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2008). Nesta publicação foram analisados vários aspectos da drenagem urbana, inclusive o problema das erosões decorrentes da falta ou da instalação incorreta do sistema de drenagem das águas. Como base foi utilizado o trabalho desenvolvido por Martins (2005), em que foram cadastradas 1252 processos de degradação

do solo no Distrito Federal (Figura 3.6) utilizando vários parâmetros, entre eles, a declividade.

No Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal é apresentada a situação da rede de drenagem pluvial nas cidades (Figura 3.7). Com base no mapa é possível ter uma noção da situação da rede de drenagem nas áreas de estudo: Gama que aparece com o sistema implantado, mas aparentemente uma parte do sistema não está implantada; Jardim Botânico com parte do sistema em implantação e parte não implantado; Ceilândia que apresenta o sistema implantado e parte parcialmente implantada; e o Incra 8 que não apresenta nenhuma informação acerca de sistema de drenagem.

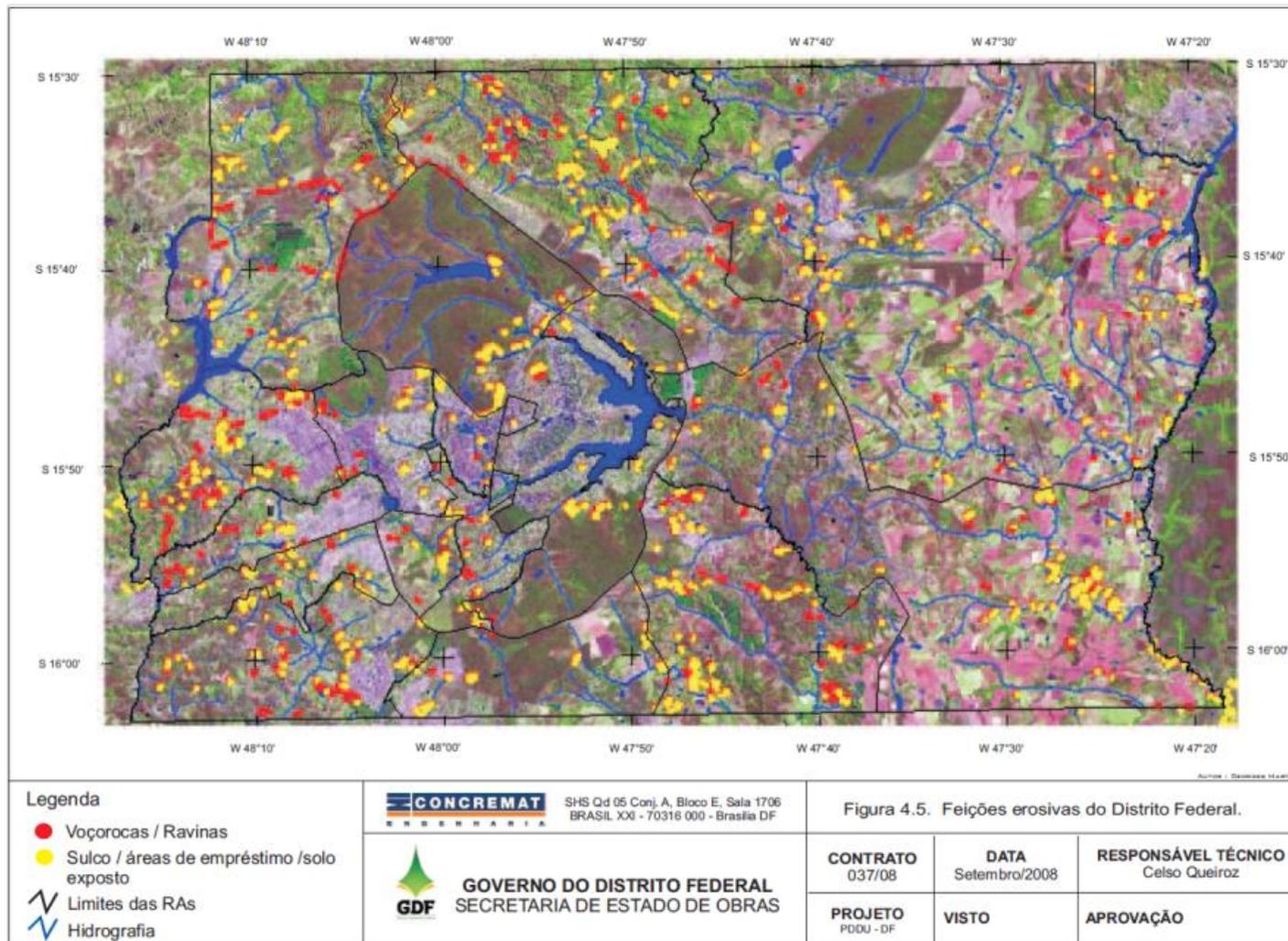


Figura 3.6 – Erosões cadastradas por Martins (2005) utilizadas como base no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2008).

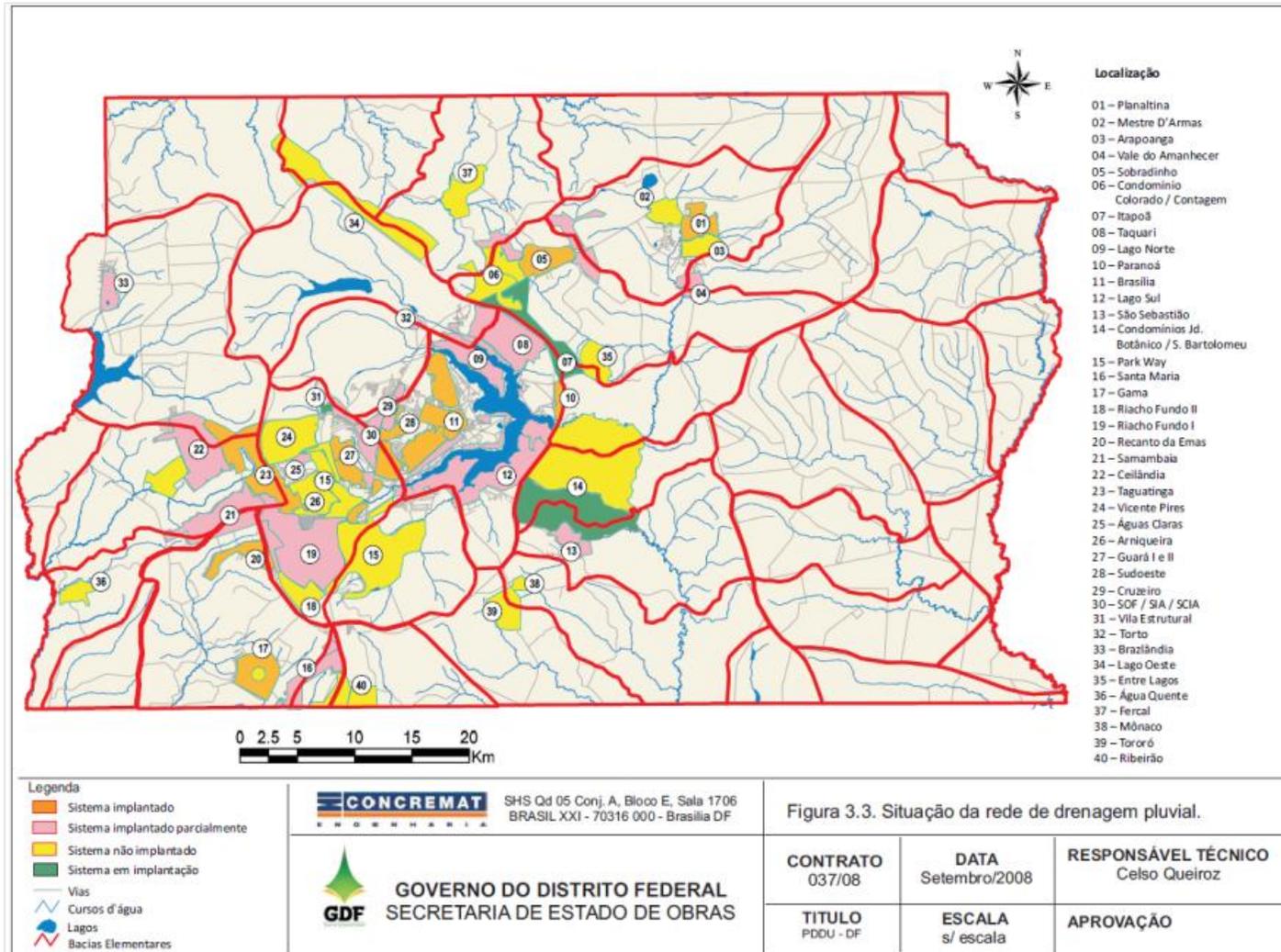


Figura 3.7 – Situação da rede de drenagem pluvial (DISTRITO FEDERAL, 2008).

### 3.8. Áreas de estudo

O trabalho está dividido em quatro áreas (Figura 3.8): Gama (Figura 3.9), Condomínios do Jardim Botânico (Figura 3.10), Ceilândia (Figura 3.11) e Incra 8 (Figura 3.12).

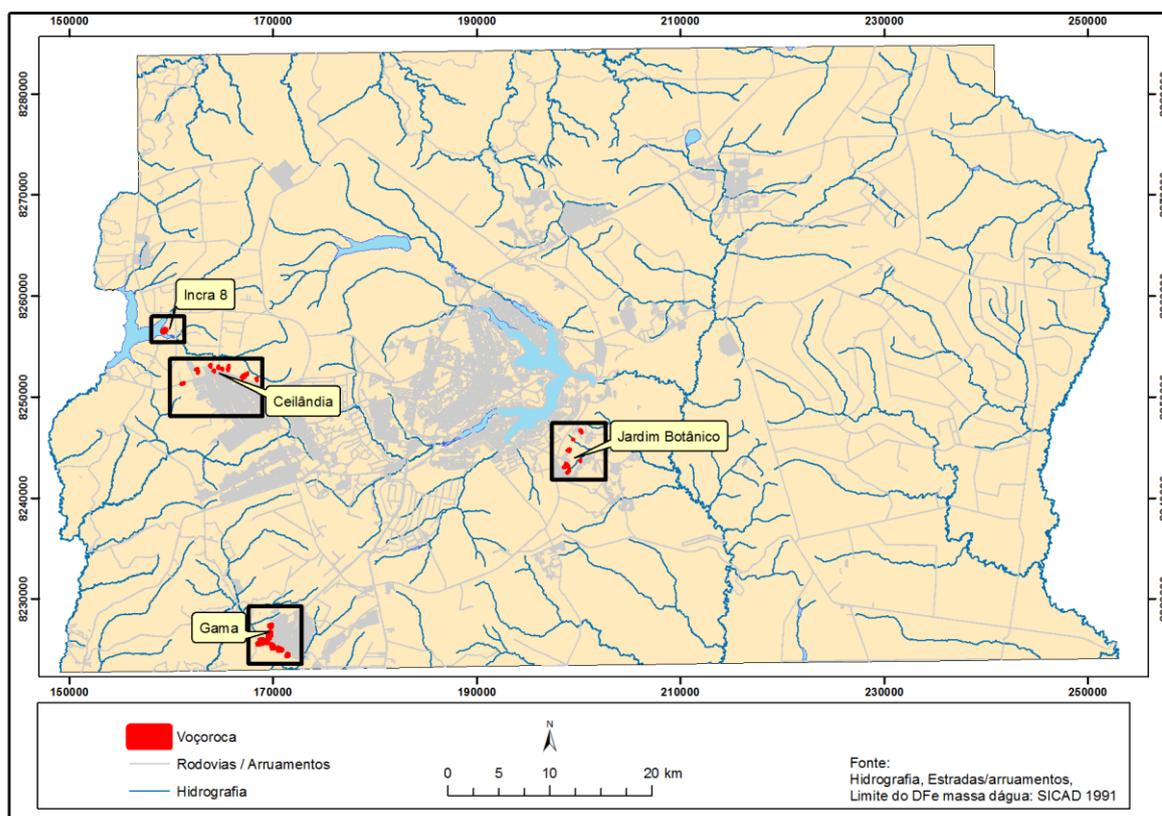


Figura 3.8 – Localização das quatro áreas de estudo, Gama, Condomínios do Jardim Botânico, Ceilândia e Incra 8.

#### 3.8.1. Gama

A cidade do Gama foi fundada em 12 de outubro de 1960 e as terras onde se localiza faziam parte das antigas fazendas Alagado, Ponte Alta, Ipê e do Gama, sendo que esta última originou o nome da cidade (CODEPLAN, 2010).

Como a área do Plano Piloto era reservada, não poderia crescer fora do plano original, sendo assim, foram criadas as cidades satélites previstas na Lei Federal 3.751/60 e eram uma solução para abrigar os operários e suas famílias que chegavam a cada dia.

A planta urbanística do Gama foi desenvolvida pelo arquiteto Paulo Hungria em 1960 e a forma lembra uma colmeia. Desse projeto, permanece até hoje a divisão da cidade em cinco setores: Norte, Sul, Leste, Oeste e Central. Os primeiros habitantes foram deslocados de núcleos populacionais provisórios, como os existentes na Barragem do Paranoá, Vila Amaury e Vila Planalto. Em 1970 foi feita outra transferência, das pessoas que habitavam o

setor de indústrias de Taguatinga (CODEPLAN, 2010). Desde então a cidade vem se consolidando, em 2005 contava com uma população estimada de 138.761<sup>1</sup> habitantes.

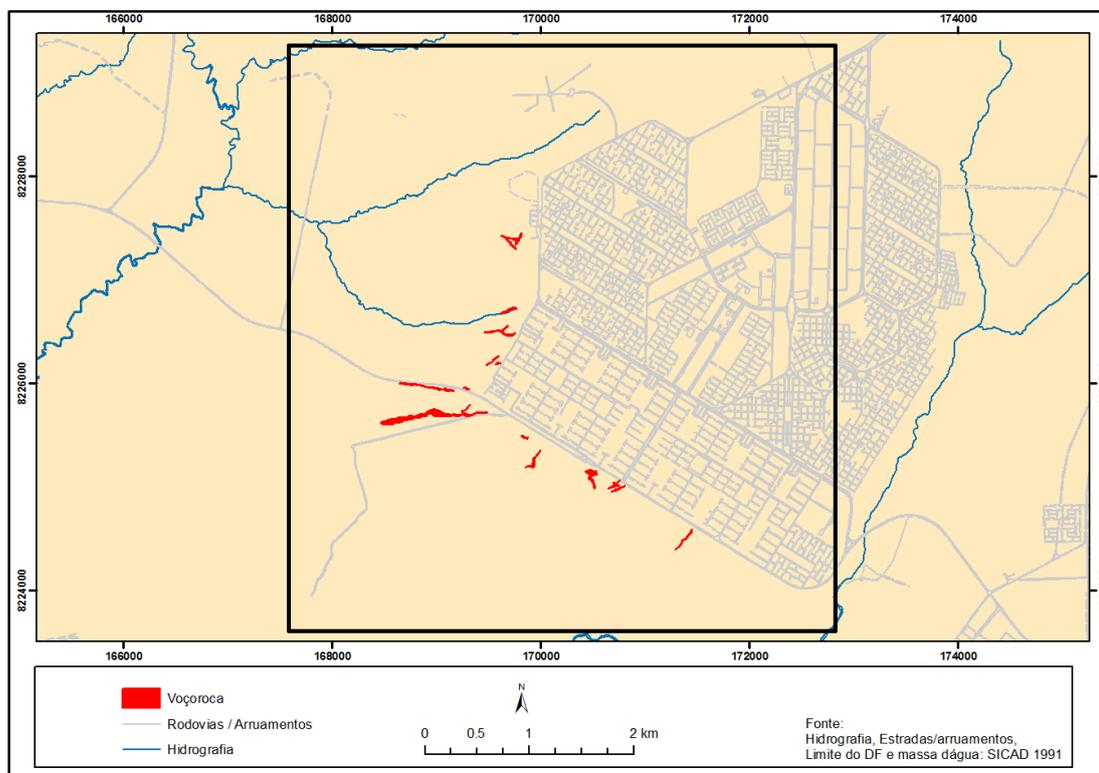


Figura 3.9 – Área do Gama com as voçorocas/ravinhas em detalhe.

### 3.8.2. Jardim Botânico

A área residencial do Jardim Botânico desenvolveu-se a partir de loteamentos, em terras públicas e particulares, e que cresceram a margem do Governo do Distrito Federal. Em 1999 passou a ser considerada como um bairro e em 2004 foi transformado em Região Administrativa pela Lei Distrital nº 3.435/2004, contudo a poligonal, ainda, não foi definida. Estima-se que vivam na área cerca de 25.000 habitantes<sup>2</sup>.

O planejamento dos condomínios e os acessos não seguem algumas regras de urbanização e em alguns casos a ocupação se deu em áreas que deveriam ser de preservação (Áreas de Preservação Permanente – APP).

Mesmo com o crescimento a revelia das instituições de Governo, essa área foi criada com um mínimo de infraestrutura urbana, como asfalto, iluminação e em algumas partes um precário sistema de drenagem de águas pluviais.

<sup>1</sup> CODEPLAN - IBGE - SEDUH/DF ([http://www.gama.df.gov.br/005/00502001.asp?ttCD\\_CHAVE=3675](http://www.gama.df.gov.br/005/00502001.asp?ttCD_CHAVE=3675))

<sup>2</sup> <http://www.admjardimbotanico.df.gov.br/>

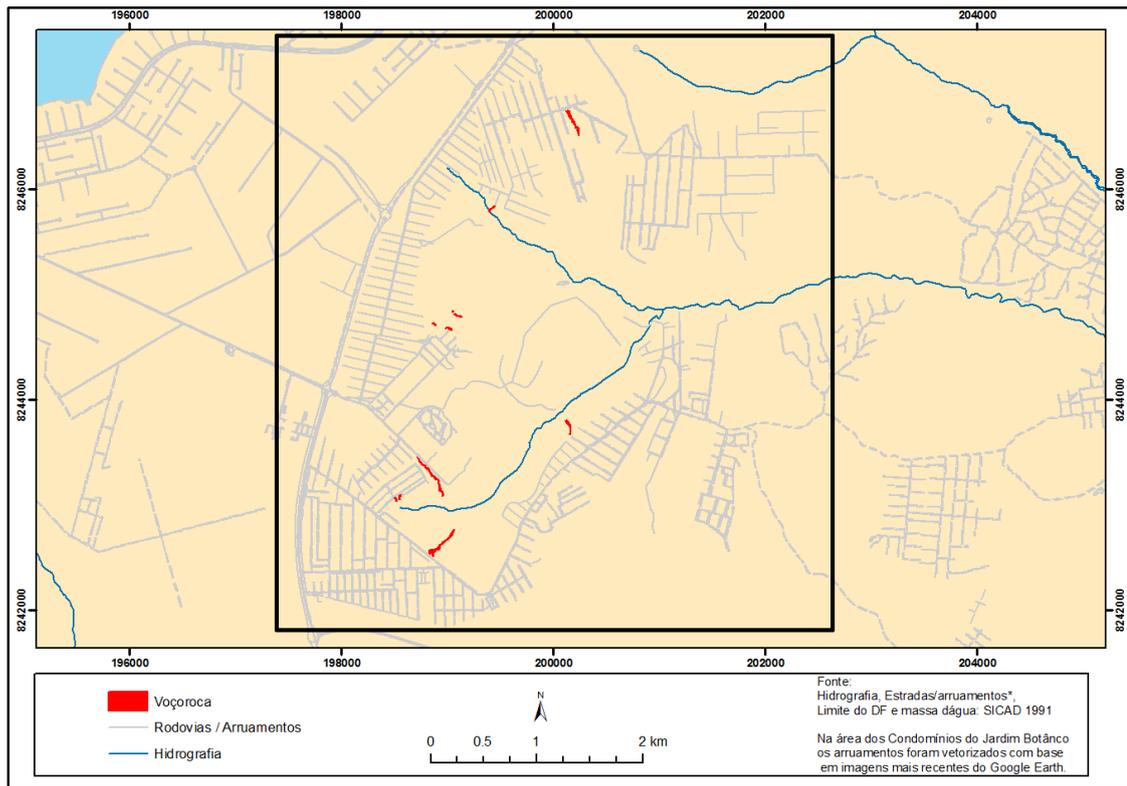


Figura 3.10 – Área do Jardim Botânico com as voçorocas/ravinas em detalhe.

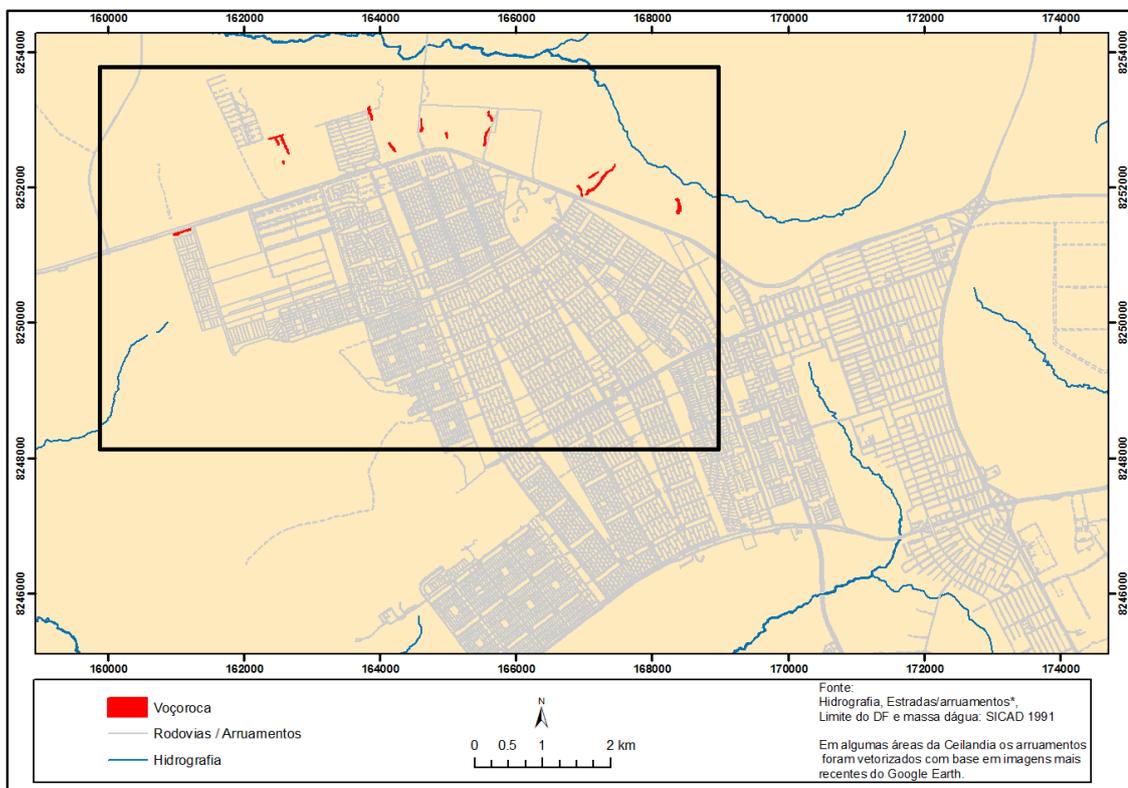


Figura 3.11 – Área da Ceilândia com as voçorocas/ravinas em detalhe.

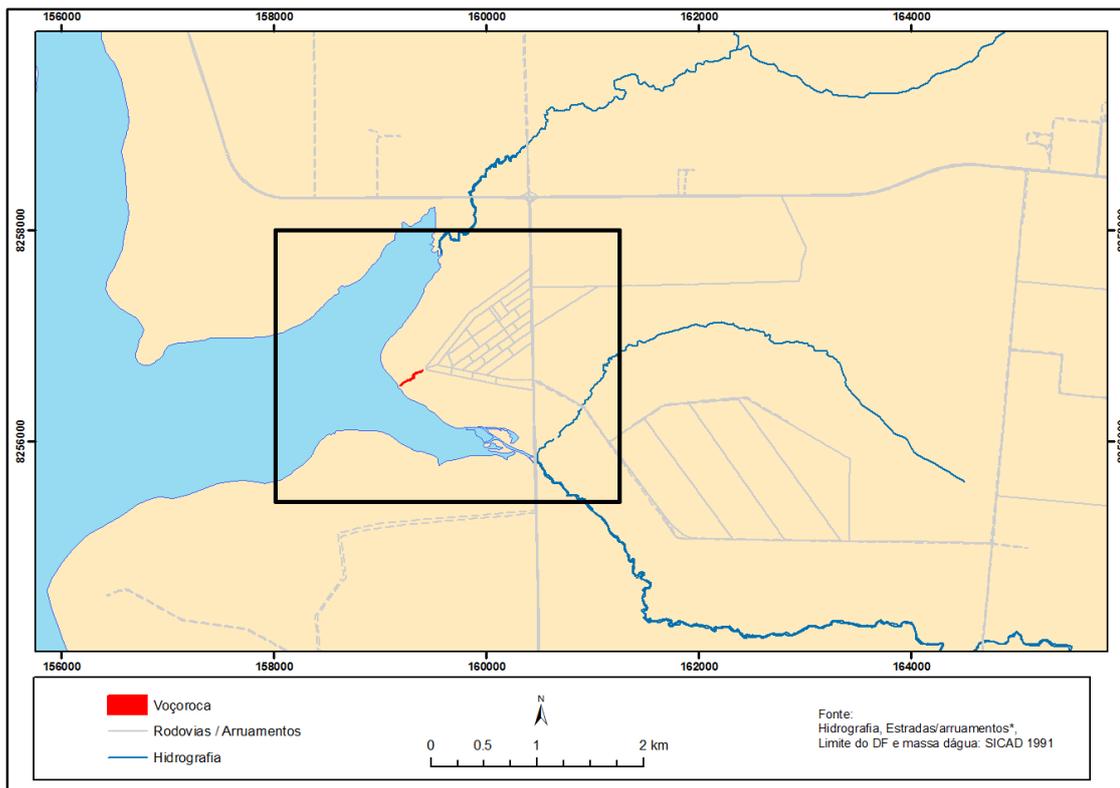


Figura 3.12 – Área do Incra 8 com as voçorocas/ravinas em detalhe.

### 3.8.3. Ceilândia

A Ceilândia, criada em 1971, foi um projeto de assentamento de famílias que viviam em invasões espalhadas por Brasília. No início foi planejada, tendo o seu projeto urbanístico elaborado pelo arquiteto Ney Gabriel. Com o crescimento passou a ser a cidade mais populosa do Distrito Federal e devido a esse fato tornou-se uma Região Administrativa, se emancipando da RA de Taguatinga (CODEPLAN, 2010). Entretanto, o crescimento por ocupações irregulares sem a menor infra-estrutura foram aparecendo e com o passar dos anos a região foi se desenvolvendo e os problemas também, várias voçorocas apareceram em seu entorno

### 3.8.4. Incra 8

O Incra 8 faz parte do Núcleo Rural Alexandre Gusmão está na Região Administrativa de Brazlândia e pode ser considerado núcleo habitacional da cidade de Brazlândia. Por não ser oficialmente uma área urbana, não foram encontradas informações estatísticas de seu desenvolvimento.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas como referências as cartas topográficas digitais da CODEPLAN (SICAD) de 1992, na escala de 1:10.000. As curvas de nível e a hidrografia foram empregadas na confecção dos MDTs.

Para a vetorização dos arruamentos, quadras e identificação das voçorocas foram utilizadas imagens coletadas no software Google Earth (Figura 4.1). Como o Google Earth disponibiliza imagens apenas para visualização e com um georreferenciamento não tão preciso, foi executada a aquisição dessas imagens capturando-as em tela, uma por uma, desabilitando a visualização do relevo e dos painéis (navegação, temas e menu). Posteriormente foi feito o mosaico de todas as imagens, georreferenciando com base nas cartas da CODEPLAN (SICAD/92).

O Google Earth não apresenta a escala da visualização, mas mostra a altitude do solo em que se encontra o observador. Assim, a altitude da visualização foi distinta para cada área de trabalho, dependendo da necessidade de detalhes e do tamanho da área. Para que houvesse um padrão, em cada área foi utilizada a mesma “escala”, mantendo a altitude constante durante a aquisição das imagens.

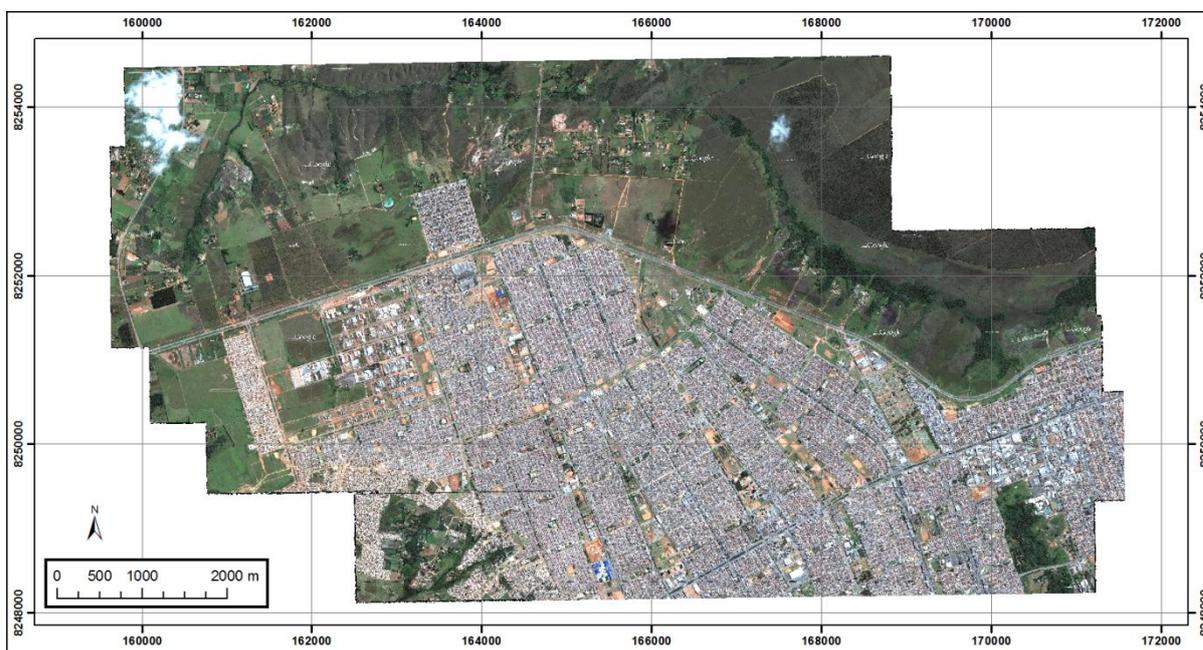


Figura 4.1 – Mosaico de imagens GeoEye de 24/03/2010, obtidas por meio de captura de tela no software Google Earth, elaborado e georreferenciado no ArcGIS.

## 4.1. MDT

Os MDTs foram obtidos por meio de interpolação de curvas de nível, com equidistância de 5 em 5 metros, utilizando o módulo Topo to Raster do software ArcGIS 9.3. A resolução espacial dos MDTs utilizada neste trabalho foi de 5 metros.

Para este trabalho foram necessários dois MDTs, um simulando a topografia natural, e o outro, a “topografia” urbana (incluindo os canais gerados pelos arruamentos e as elevações geradas pelas casas).

### 4.1.1. Pré-processamento

Para a obtenção desses dados foram executadas algumas etapas intermediárias:

- a) Identificação das cartas do SICAD que cobriam cada uma das quatro áreas de estudo;
- b) Conversão dos dados CAD em shapefile e junção das cartas por meio da ferramenta *merge* para cada área de estudo;
- c) Identificação dos divisores de águas para eliminar as partes das cartas que não tem relação direta com as áreas de estudo, conseqüentemente, reduzindo o volume de dados para corrigir.
- d) Correção topológica dos dados de hidrografia e curvas de nível, baseada nas seguintes regras:
  - Não deve se sobrepor com outra linha;
  - Não deve haver interseção com outra linha;
  - Não deve haver linhas desconectadas;
  - Não deve existir falsos nós (isso acontece quando o que deveria ser uma única linha é composta por mais de um ente);
  - Não deve tocar ou haver interseção com si própria;
  - Não deve se sobrepor;
  - Não deve haver interseção com si própria, deve ser “single part” (cada linha separada espacialmente deve ser um único ente);
- e) Atribuição das cotas às curvas de nível;
- f) Correção de feições antrópicas nas curvas de nível;

- g) Geração de um MDT para a correção automática da direção do fluxo da hidrografia com base nas curvas de nível corrigidas e com cotas atribuídas.
- h) Correção da direção do fluxo citado no item anterior;

A correção topológica foi utilizada para eliminar erros nos dados de entrada como: falta de conectividade de linhas, sobreposição e intersecção. Esses erros dificultam ou mesmo interferem no resultado, além do que um dado corrigido topologicamente é mais fácil de manusear.

Os dados originais em formato CAD não apresentavam valores de cotas atribuídos às curvas de nível na tabela de atributos, estavam presentes apenas como *labels*. Assim foi necessário colocar os valores de altimetria na tabela de atributos do dado convertido para shapefile para que possam ser utilizados na interpolação.

As curvas de nível originais apresentavam várias feições de origem antrópica, pois quando foram confeccionadas já existiam construções, arruamentos, movimento de terra, entre outros. Como o objetivo deste trabalho é tentar identificar a influência da superfície urbana no desenvolvimento de voçorocas, foram feitas correções nas curvas de nível onde as feições antrópicas são mais evidentes, como cortes e aterros de estrada (Figura 4.2).

Mesmo com a topologia da hidrografia corrigida ainda era necessária a correção da direção do fluxo, pois quando o dado foi criado não existia essa preocupação de vetorizar com o fluxo no sentido correto (Figura 4.3). Para essa correção foi gerado um MDT, apenas com as curvas de nível corrigidas e cotadas, para ser utilizado no algoritmo *Drain Direction* (Anexo A), desenvolvido por Stephen Lead<sup>3</sup> e que utiliza os valores de altimetria do MDT para corrigir a direção do fluxo. Esse algoritmo foi obtido do site da ESRI, na seção em que são disponibilizados scripts desenvolvidos por usuários, e executado no software ArcInfo Workstation 8.1.

---

<sup>3</sup> Autor do *drain\_direction.aml*, algoritmo de correção automática de direção do fluxo por meio do MDT. Disponível em: <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=11314>. (Acessado em janeiro de 2011).

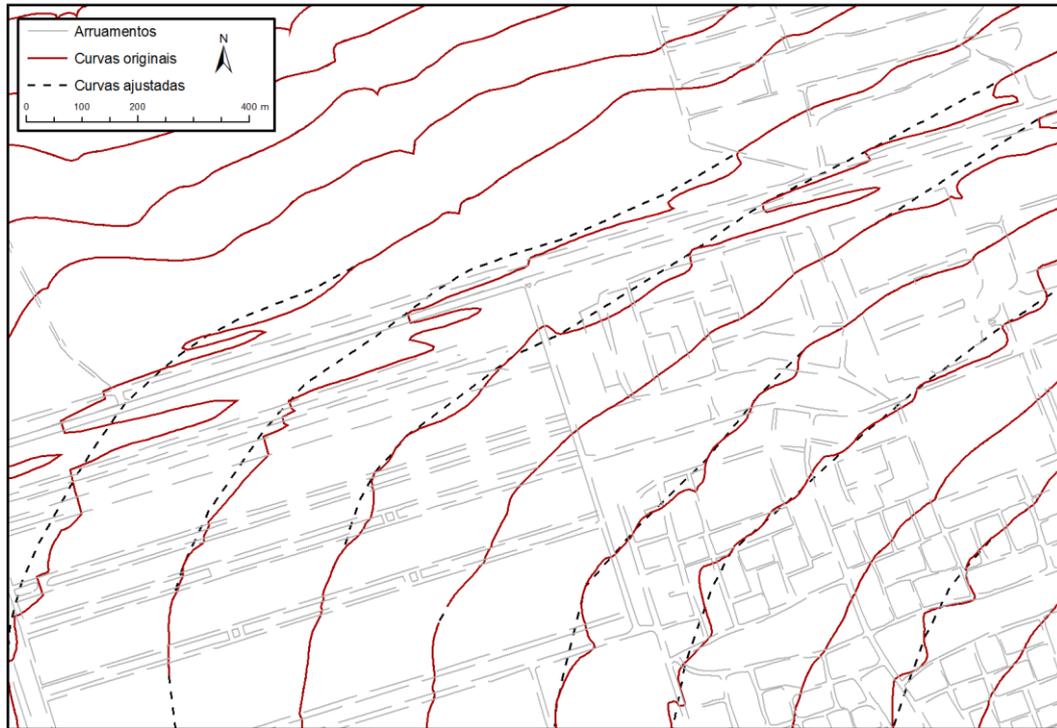


Figura 4.2 – Curvas de nível originais (CODEPLAN/SICAD-1992) e editadas para eliminar as feições antrópicas.

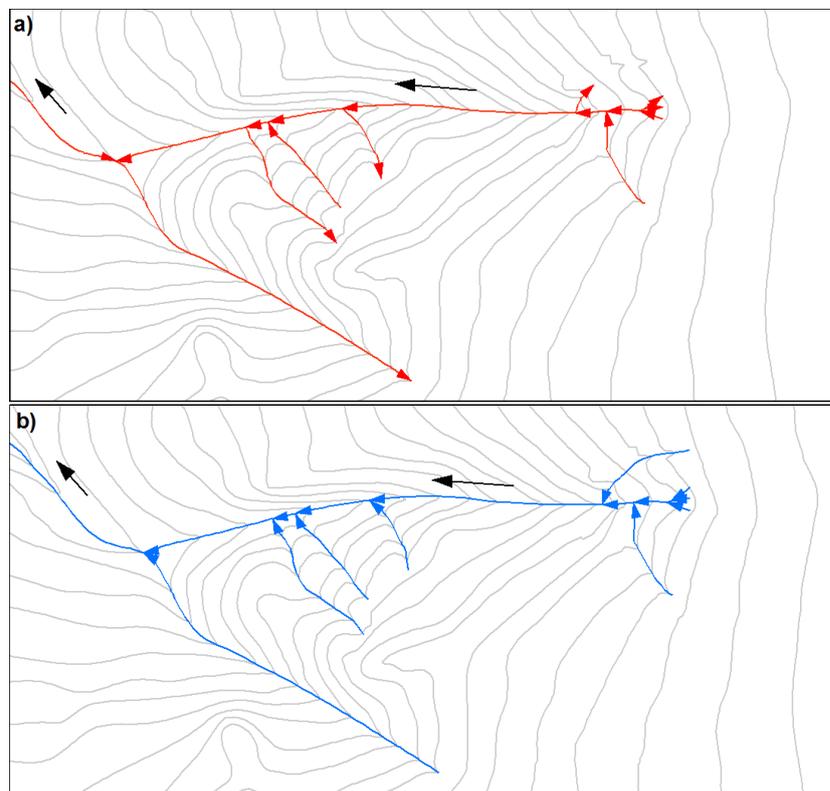


Figura 4.3 – Vetores de hidrografia antes (a) e após (b) a correção da direção de fluxo.

#### 4.1.2. Ajustes dos parâmetros de interpolação do Topo To Raster

Para melhorar o resultado do processo de interpolação, esse módulo permite o ajuste de alguns parâmetros. A utilização dos parâmetros padrão do software tem como resultado uma superfície que apresenta falsos patamares nas proximidades das curvas de nível, resultado de uma característica do interpolador. A não suavização desses patamares interfere no resultado dos mapas derivados, como declividade, aspecto e fluxo acumulado.

Deste modo, para a obtenção do MDT foram ajustados alguns parâmetros no módulo Topo to Raster, no intuito de minimizar as anomalias causadas pela influência dos valores onde há dados em detrimento das áreas que serão interpoladas. Os valores padrão do módulo não são adequados para todos os tipos de MDTs, assim, para os MDTs pré-urbanos, que apresentam as curvas de nível como dados primários de elevação, foram utilizados os valores da coluna “Linha” apresentados na Tabela 4.1. Já os MDTs pós-urbanos, tem os pontos como dados primários de elevação e para estes os valores utilizados foram os dispostos na coluna “Ponto” da Tabela 4.1.

Apenas com esses ajustes foi possível notar na Figura 4.4 as diferenças nos resultados, quando se utilizam os parâmetros padrão e ajustado. Sem o ajuste na interpolação para a obtenção do MDT a declividade calculada é mais acentuada nos declives mais íngremes. Com os ajustes é possível notar que os valores de declividade tendem a apresentar uma menor amplitude, se aproximando mais de uma “reta horizontal” já que nos exemplos os perfis são de superfícies aparentemente homogêneas, exceto o perfil 1, e por isso deveriam apresentar uma declividade uniforme. Contudo, existem variações de distâncias das curvas de nível, o que faz com que a declividade também sofra variações.

Além disso, a utilização dos parâmetros padrão tende a “marcar” o modelo, pois há a criação de pequenos patamares nas proximidades das curvas de nível, interferindo na confecção do mapa de fluxo acumulado como apresentado na Figura 4.5 (a) em que ocorre, próximo as curvas de nível, falsas elevações no terreno, como se fossem morrotes que dividem o fluxo e com isso o resultado do fluxo acumulado pode apresentar inconsistências. Entretanto ao se ajustar os parâmetros para o tipo de dado de entrada na interpolação do MDT, o fluxo acumulado, se apresenta de forma contínua, sem as feições de morrotes, sofrendo uma suavização na concentração da área drenada Figura 4.5 (b).

Tabela 4.1 - Configuração dos parâmetros do Topo to Raster para cada tipo de dado de entrada.

Parâmetro	Padrão	Linha	Ponto	Descrição
Margem em células (Margin in cells)	20	20	20	Distância em células para interpolar além da extensão de saída especificada e limite
Menor valor z para ser utilizado na interpolação (Smallest z value to be used in interpolation)	(Em branco)	(Em branco)	(Em branco)	Limitar o menor valor e o maior valor para interpolação
Maior valor z para ser utilizado na interpolação (Largest z value to be used in interpolation)	(Em branco)	(Em branco)	(Em branco)	
Aplicação da drenagem (Drainage enforcement)	ENFORCE	ENFORCE	ENFORCE	O tipo de aplicação da drenagem na interpolação. Utilizado para remoção de depressões no canal de drenagem, quando desejado.
Tipo do dado primário (Primary type of input data)	COUNTOUR	COUNTOUR	SPOT	O tipo do dado de entrada com informações de elevação dominante.
Número máximo de interações (Maximum number of interations)	40	45	40	Número máximo de interações da interpolação. Valores acima de 30 limpam pequenas depressões, já valores acima de 45 raramente tem utilidade na limpeza de mias depressões.
Penalidade de rugosidade (Roughness penalty)	(Em branco)	0	0,5	Utilizado para suavizar a interpolação. Para linhas o sugerido é 0 e pontos 0,5.
Fator de erro de discretização (Discretisation error factor)	1	1.5	1	Utilizado para ajustar a intensidade da suavização. Valores menores resultam em menos suavização
Erro padrão vertical (Vertical standard error)	0	1	0	A quantidade de erro aleatório nos valores de z do dado de entrada.
Tolerância 1 (Tolerance 1)	(Em branco)	2.5	0	Essa tolerância reflete a acurácia e densidade dos pontos de elevação em relação a drenagem. Por padrão o valor é ajustado para 2.5 quando o dado é linha e 0 quando o dado é ponto.
Tolerância 2 (Tolerance 2)	(Em branco)	100	200	Essa tolerância previne que a drenagem ultrapasse barreiras com altitudes irrealis. O padrão é 100 para linha e 200 para ponto.

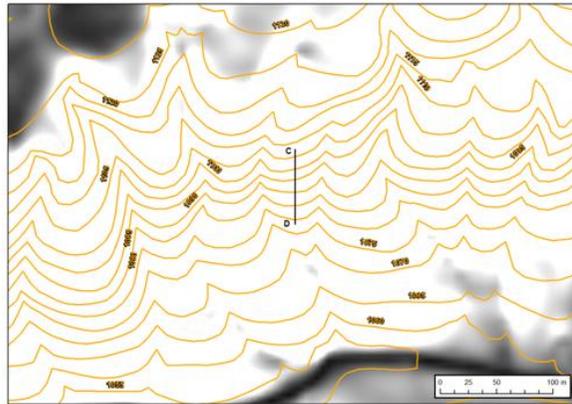
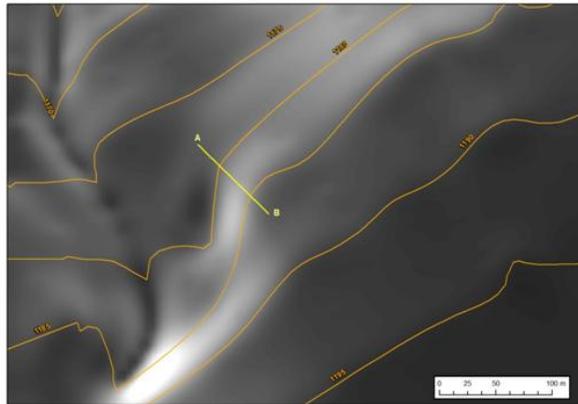
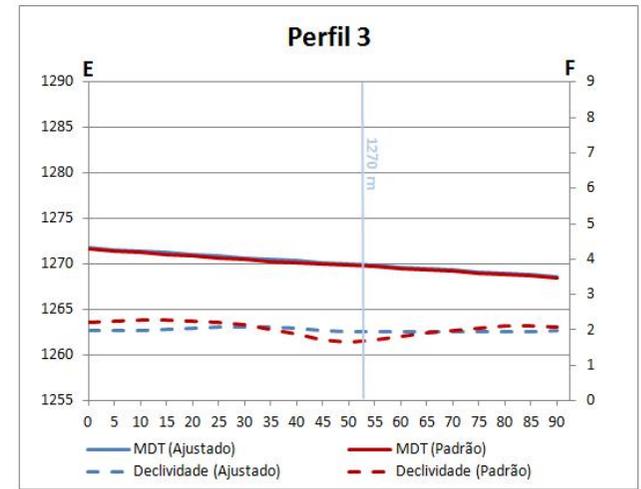
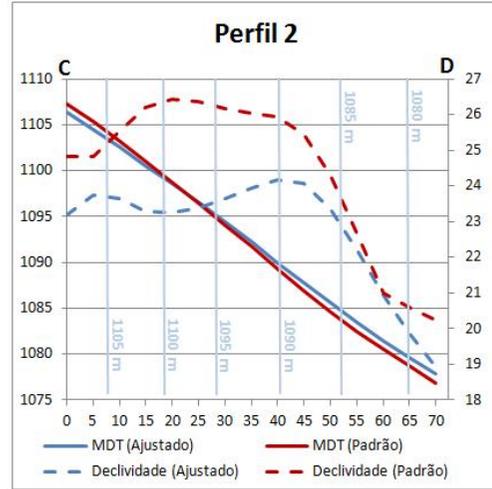
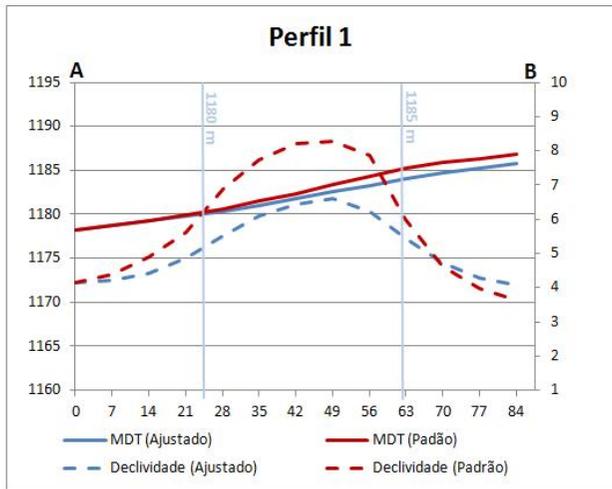


Figura 4.4 – Resultados dos perfis a partir de MDTs elaborados com parâmetros padrão e ajustados. Perfil 1: local com declividade média, pequena suavização da altimetria e grande suavização da declividade; Perfil 2: local com declividade mais acentuada, pequena suavização da altimetria e grande suavização da declividade; Perfil 3: local plano: diferenças insignificantes na altimetria e pequena suavização da declividade.

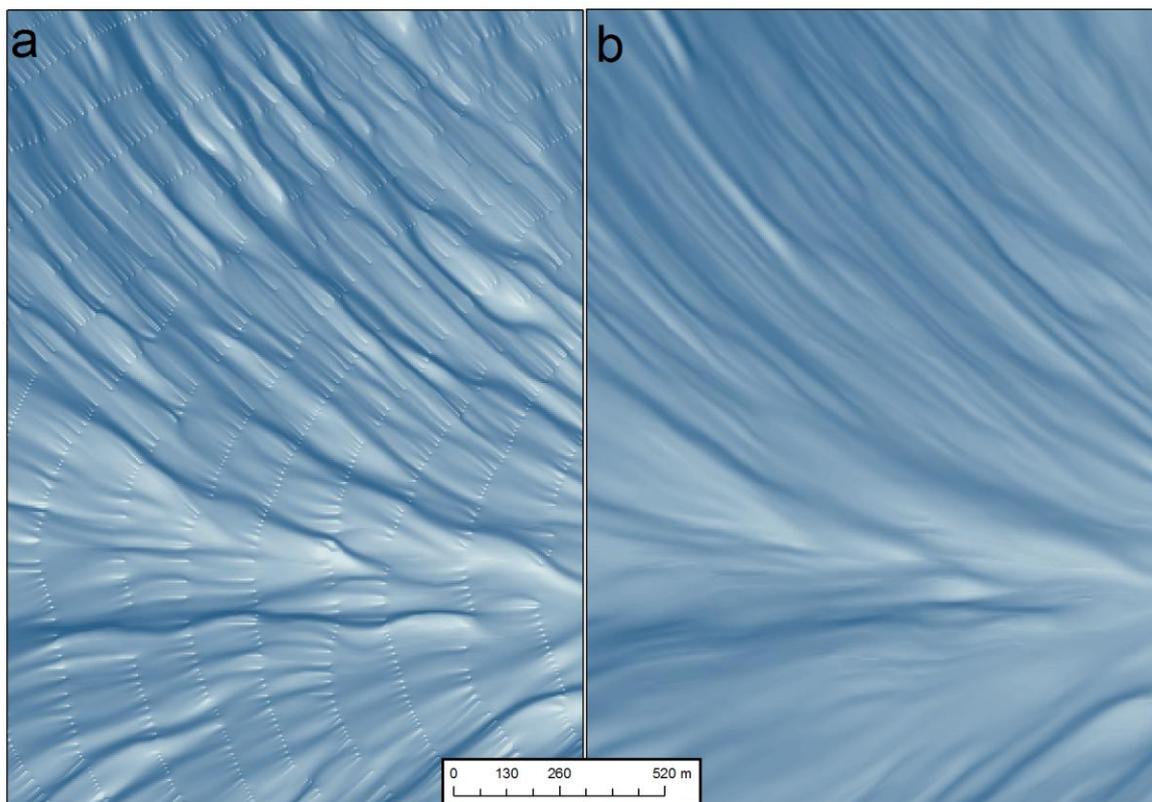


Figura 4.5 – Comparação dos mapas de fluxo acumulado obtidos de MDT sem ajustes (a) e com ajuste (b) na interpolação. No (a) as curvas de nível ficam marcadas na superfície simulando falsas elevações. Já no (b) há uma suavização da concentração do fluxo acumulado.

#### 4.1.3. MDTs pré e pós-urbano

Os MDTs pré-urbanos foram obtidos por meio de interpolação dos vetores das curvas de nível e da hidrografia devidamente corrigidos. Para obtenção dos MDTs pós-urbanos foram utilizados como base os MDTs pré-urbanos, convertidos de GRID para pontos. Desta forma, o valor de cada pixel passou a ser representado por ponto, permitindo inserir as elevações características das quadras e que esse dado seja interpolado novamente com os vetores de arruamentos como se fossem drenagem.

Entretanto antes de interpolar esse dado se faz necessário separar os pontos referentes às quadras, dos pontos que não sofrerão alteração (Figura 4.6). Para isso foi utilizado os polígonos das quadras como máscara, para selecionar os pontos referentes a estas áreas e somado o valor de 4 metros ao valor de altimetria de cada ponto, para que passem a simular a intervenção que as casas provocam, fazendo com que as quadras atuem como divisores de águas e os arruamentos como canais de drenagem (Figura 4.7).

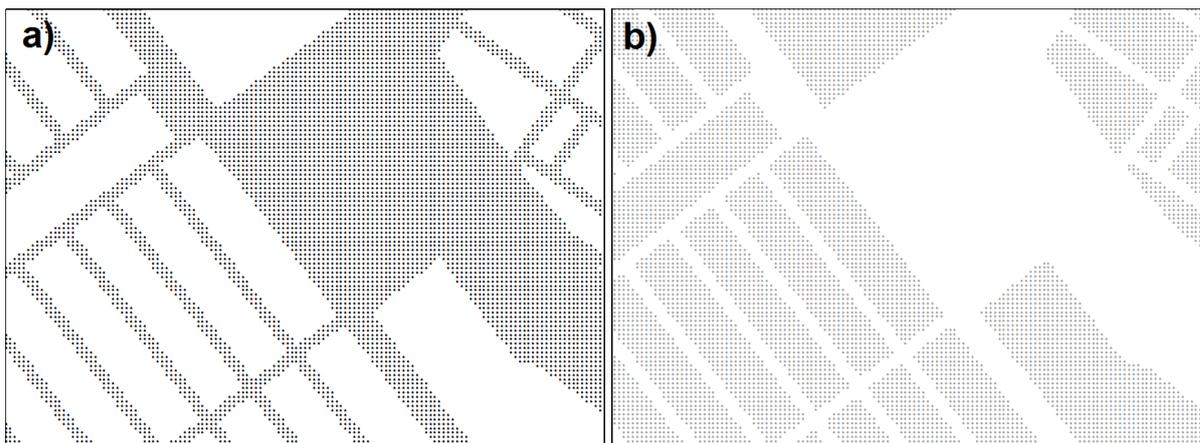


Figura 4.6 – (a) Pontos com informações extraídas do MDT pré-urbano; e (b) pontos selecionados pelos polígonos das quadras com valores do MDT pré-urbano com mais quatro metros adicionados.

Com intuito de se obter a rede de drenagem ao longo dos arruamentos, os vetores referentes aos arruamentos foram segmentados em comprimentos de até dez metros. Este procedimento é necessário porque os arruamentos não tem a mesma disposição no terreno que a hidrografia, a qual inicia no ponto mais alto e sempre tende ao ponto mais baixo, seguindo a declividade. Os arruamentos podem transpassar vários divisores de águas e vales, não tendo a declividade como referência. Assim, ao segmentar esses arruamentos e corrigir sua direção de fluxo com base no MDT, eles estarão ajustados ao terreno e o fluxo nesses vetores seguirá para o ponto mais baixo, podendo ser utilizados como canais de drenagem na interpolação. (Figura 4.8). Desta forma, tiveram a direção do fluxo corrigida, da mesma forma que a hidrografia, utilizando o algoritmo *drain\_direction.aml* aplicado ao MDT pré-urbano.

#### 4.2. Fluxo acumulado

Para a obtenção do fluxo acumulado foi utilizado o método do D-Inf ( $D^\infty$ ) proposto por Tarboton (1997) e que busca a distribuição proporcional do fluxo que chega a determinado pixel de acordo com a declividade (Figura 2.5). O fluxo acumulado é um dado que simula o escoamento superficial da água apontando os locais onde há concentração ou dissipação do fluxo.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi gerado um mapa de fluxo acumulado para o terreno pré-urbano e outro para o terreno pós-urbano para cada uma das quatro áreas de estudo. Os mapas de fluxo acumulado obtidos têm suas unidades em metros, mas para que o resultado possa ser melhor representado foi aplicado o  $\log_{10}$  para os mapas, sendo que esses mapas é que foram utilizados no trabalho.

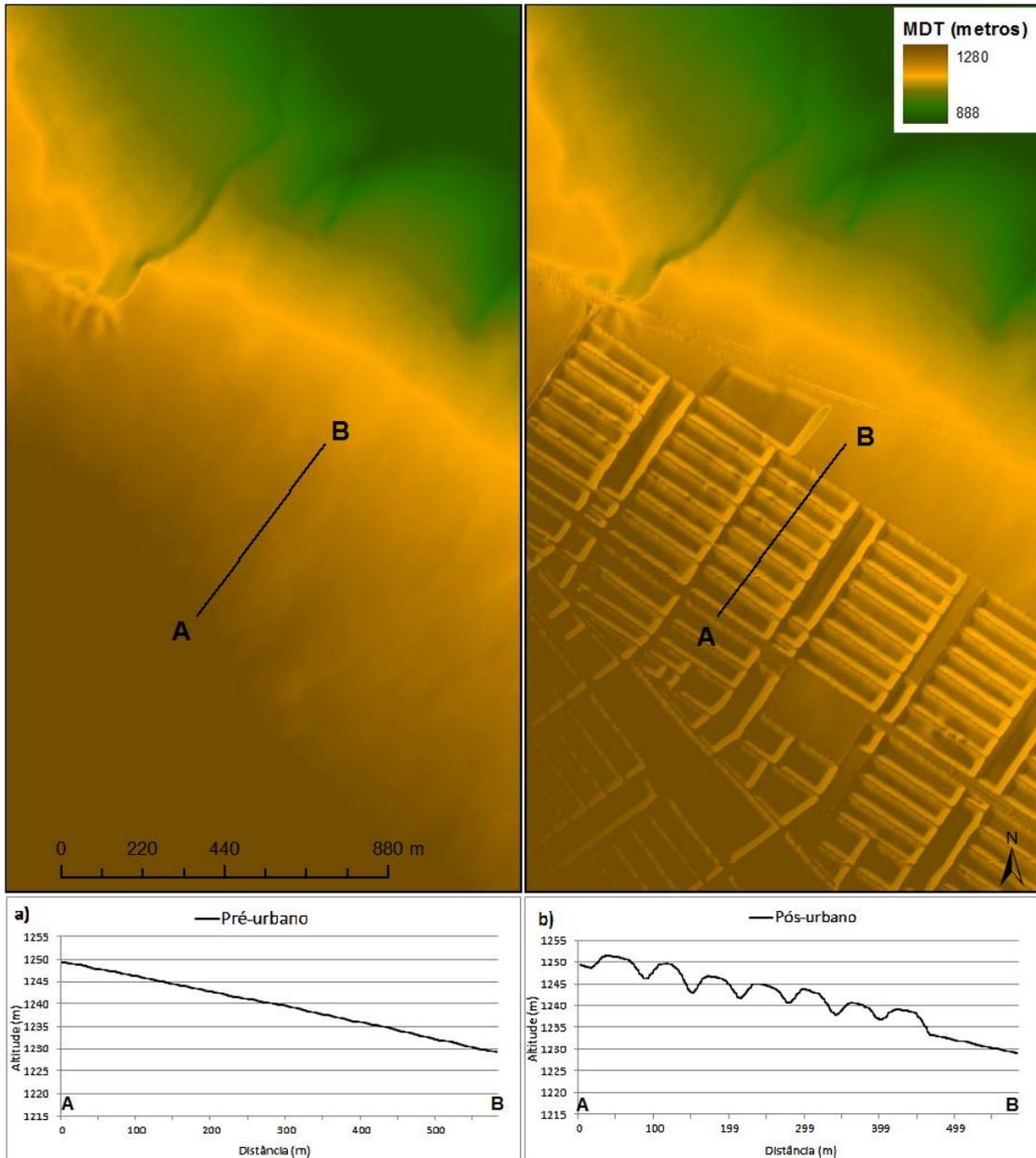


Figura 4.7 – Perfis topográficos dos terrenos pré-urbanização (a), e pós-urbanização (b).

### 4.3. Mapa de identificação da alteração do fluxo acumulado.

Com os dois mapas de fluxo acumulado, para cada uma das quatro áreas, foi aplicado o método proposto por Carvalho Junior *et al.*, (2010), onde o mapa de fluxo acumulado correspondente a área pré-urbana foi subtraído da área pós-urbana. Com isso o resultado gera um mapa, que mostra os locais onde a alteração da superfície pela urbanização modificou a dinâmica do escoamento superficial, concentrando o fluxo em um local que não existia anteriormente, ou se existia apresentava valores menores, sendo ainda possível visualizar toda a nova rede de drenagem estabelecida.

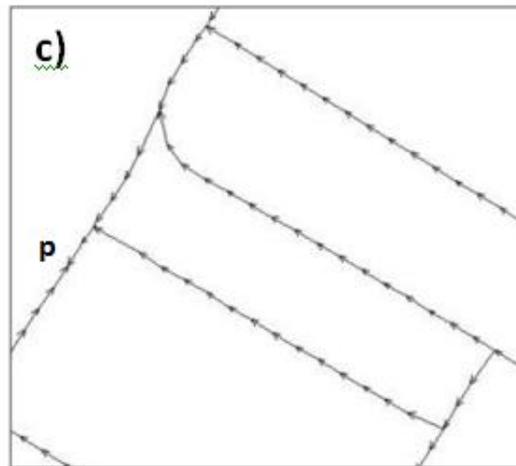
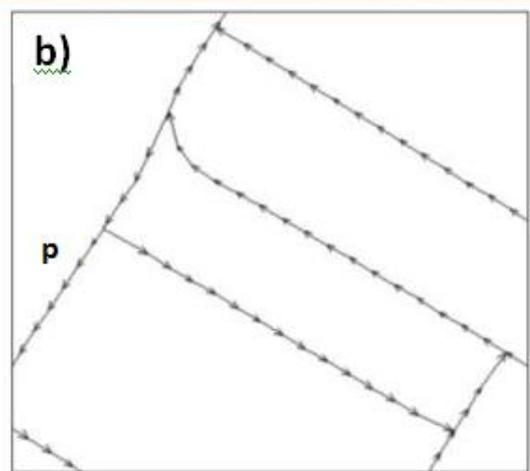
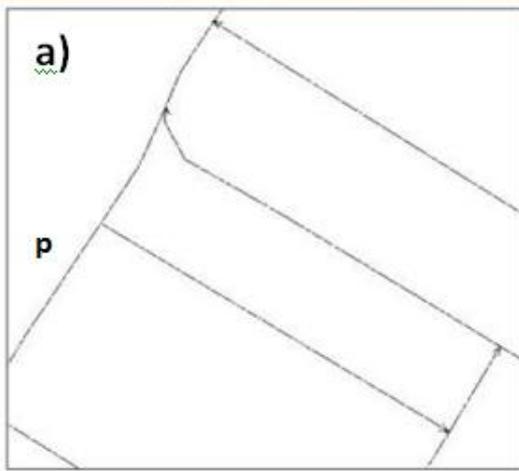
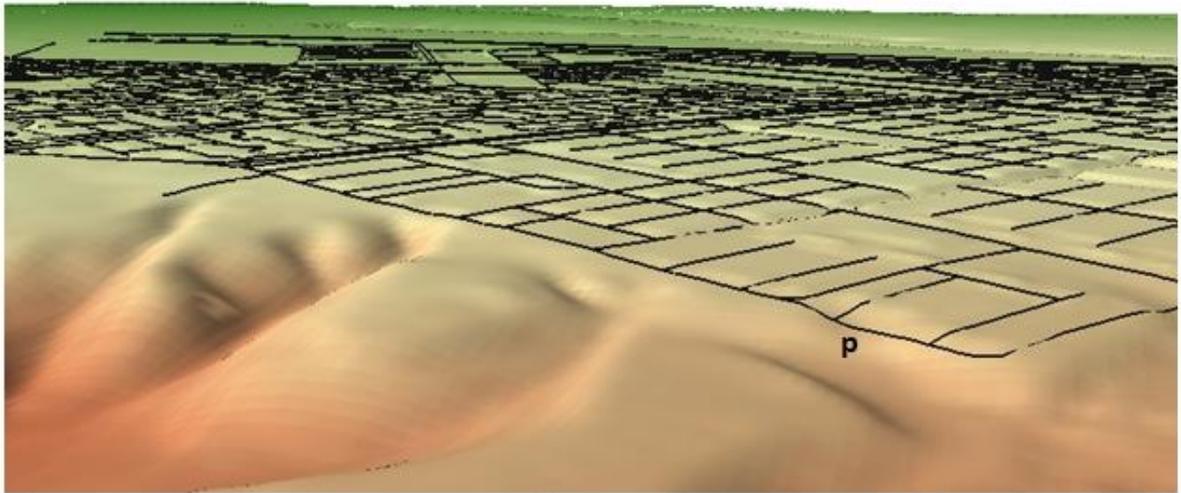


Figura 4.8 – Necessidade de ajuste dos vetores dos arruamentos ao relevo para que o fluxo corra para o ponto mais baixo. a) vetores inteiros; b) vetores segmentados de 10 em 10 metros; e c) direção de fluxo dos vetores segmentados corrigida pelo MDT. O ponto p indica o local onde o terreno apresenta uma depressão e como a correção do fluxo se ajusta a esta situação.

#### **4.4. Classes de relevo**

A utilização de classes de relevo tem como objetivo identificar a existência de padrões de declividades relacionados ao desenvolvimento de ravinas e voçorocas. Para isso foi gerado um mapa de declividade, com os valores em porcentagem.

O mapa de declividade foi recategorizado de acordo com as classes de relevo descritas em Embrapa (2006). Embora essas classes tenham sido desenvolvidas para a agricultura também permitem inferências sobre a suscetibilidade dos solos a erosão.

As classes de relevo são:

- Plano – superfícies com desnivelamentos pequenos e declividades variáveis  $\leq 3\%$ .
- Suave ondulado – superfícies pouco movimentadas, que apresentam colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50m e de 50 a 100m, respectivamente), com declives suaves de  $>3\%$  a  $\leq 8\%$ .
- Ondulado – superfícies com característica semelhantes ao suave ondulado mas com declives moderados, variando de  $>8\%$  a  $\leq 20\%$ .
- Forte ondulado – apresenta topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros (elevações de 50 a 100m e de 100 a 200m de altitudes relativas) e raramente colinas, apresenta declives fortes, variando de  $>20\%$  a  $\leq 45\%$ .
- Montanhoso - superfície de topografia vigorosa, com formas acidentadas e constituída por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, com desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes que variam de  $>45\%$  a  $\leq 75\%$ .
- Escarpado – predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos apresentando declives  $>75\%$ .

#### **4.5. Declividades nas voçorocas**

Os valores de declividade nas áreas das voçorocas foram obtidos, no software ArcGIS, por meio das cicatrizes mapeadas e pelos mapas de declividade. Assim, utilizaram-se os polígonos referentes às cicatrizes para extrair do mapa de declividade os pixels correspondentes, que posteriormente foram convertidos para pontos (Figura 4.9) e identificados na tabela de atributos a qual erosão se referia.

Com base nessa tabela foi executada a ferramenta *Summary Statistics*, do software ArcGIS, para extrair os valores de número de pixels , declividade média, mínima, máxima, desvio padrão, amplitude.



Figura 4.9 – Cicatriz da voçoroca e os pontos com os valores de declividade corespondente.

#### **4.6. Mapas de Geologia, Solos e Geomorfologia.**

Como há uma forte relação entre a ocorrência das ravinas e voçorocas com o meio físico em que se encontra, uma parte deste trabalho será a análise das voçorocas estudadas com as características geológicas, geomorfológicas e pedológicas locais.

Para essas análises serão utilizados os mapas de geologia, solos e geomorfologia integrantes do relatório da ZEE RIDE – Fase I (BRASIL, 2003). Existe uma diferença nas escalas desses mapas (1:250.000) das cartas topográficas utilizadas para o trabalho (1:10.000) e também do mapeamento dos arruamentos e das voçorocas (escala variável de acordo com a resolução das imagens), entretanto, isso não compromete as análises, mesmo que ocorram algumas generalizações/simplificações de feições e/ou erros no posicionamento dos limites nas informações dos mapas de escala menor.

Existe uma diferença entre o mapa geológico integrantes do relatório da ZEE RIDE – Fase I com o mapa apresentado por Freitas-Silva & Campos (1999) na Figura 3.2 decorrente da diferença de interpretação já citada no item 3.4.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Resultados

Os resultados estão apresentados para as quatro áreas de estudo, em que foram abordados os seguintes aspectos: ocorrência das voçorocas e classe de relevo, forma do relevo no local da cidade, MDT e mapa de fluxo acumulado do terreno pré-urbanizado e pós-urbanizado, e comparação das diferenças de fluxo acumulado nos dois terrenos.

#### 5.1.1. Gama

A cidade do Gama está em uma área com declive plano a suave ondulado e em poucos locais chegando ao ondulado. Margeando a cidade o declive apresenta alguns pontos de ondulado a montanhoso (Figura 5.1). Nos perfis da Figura 5.2 é possível notar que a cidade está em uma área com poucas ondulações, mas com caimento constante no sentido SW e W até atingir uma ruptura abrupta do relevo, favorecendo neste trecho, o desenvolvimento de voçorocas, já que se trata de uma borda em processo de dissecação.

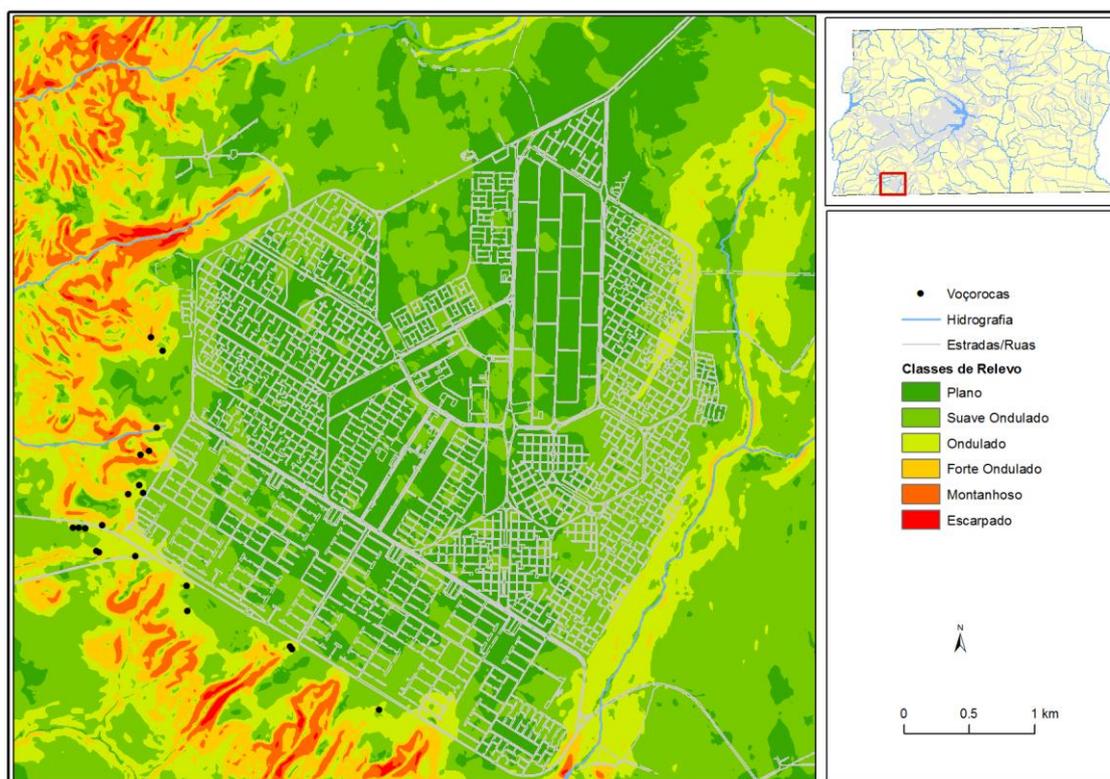


Figura 5.1 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas no Gama.

O Gama foi estudado por Carvalho Junior *et al.* (2010), em que identificaram o impacto da urbanização no desenvolvimento de voçorocas decorrente da alteração da dinâmica hidrológica, por meio de análise multitemporal dos dados topográficos. Os resultados obtidos corroboraram a teoria de que a alteração da superfície, decorrente da

impermeabilização do solo e canalização da água das chuvas nos arruamentos, exerce influência direta no desenvolvimento de voçorocas (Figura 5.3).

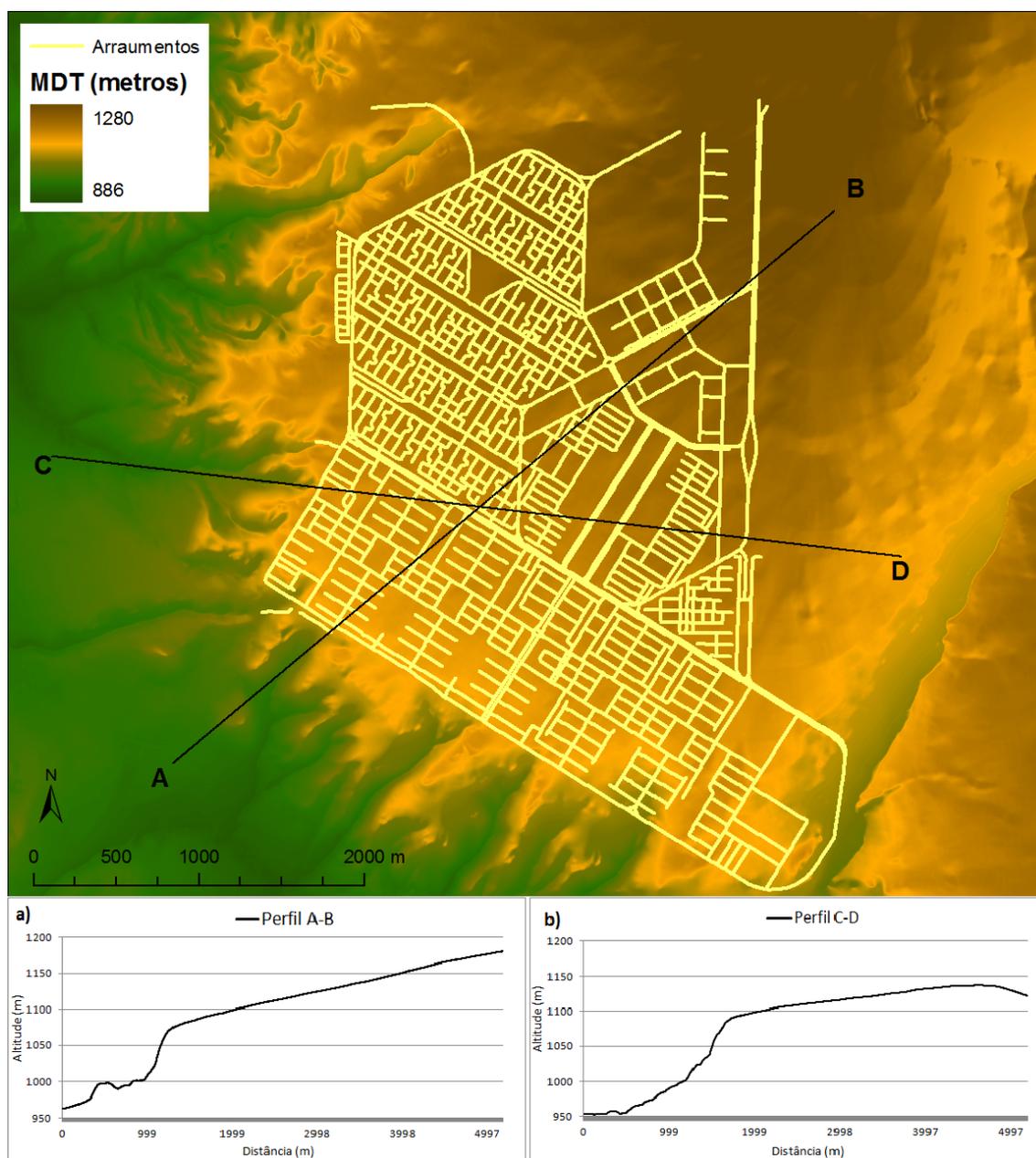


Figura 5.2 – Perfis topográficos da área urbana do Gama. Ambos mostram a ruptura de declive entre a chapada e o vale dissecado.

### Localização das fotos

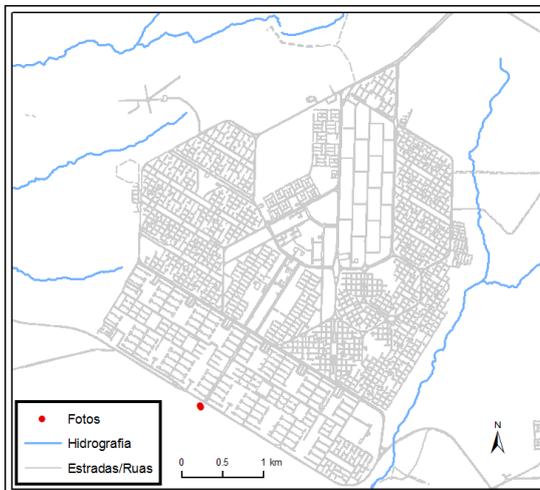


Figura 5.3 – a) ocorrência de ravina coincidindo com o fim do arruamento e b) na continuação da ravina a ocorrência de uma voçoroca.

O MDT pré-urbano (Figura 5.4), mostra duas superfícies distintas. A primeira em cor amarela correspondente a área de chapada sem muitas rugosidades, e a segunda em cor verde correspondente a um terreno mais movimentado com a presença de vários canais de drenagem. Estas duas superfícies também são diferenciadas na Figura 5.5, que representa

o fluxo acumulado, em que a área de chapada apresenta um escoamento difuso e a área dissecada apresenta o fluxo sendo canalizado pela rede de drenagem.

Ao inserir as estruturas urbanas (quadras e arruamentos) na confecção do MDT o terreno passa a ter outras características (Figura 5.6). Apresentando elevações abruptas, e canalizando o fluxo de forma forçada, pelos arruamentos, para locais diferentes dos originais. A Figura 5.7 mostra o mapa de fluxo acumulado com as alterações características do ambiente urbano, nele é possível notar a existência de blocos formados pelas quadras, que contribuem na canalização do fluxo para os arruamentos.

A alteração da superfície do terreno pela urbanização transforma radicalmente a dinâmica no escoamento superficial da área afetada e de sua periferia, devido à concentração do fluxo em canais estabelecidos pelos arruamentos. A Figura 5.8 mostra a alteração de fluxo acumulado (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré-urbanizado e o pós-urbanizado). As porções vermelhas correspondem as áreas em que a concentração de fluxo aumentou após a urbanização. Com essa alteração os eventos pluviais de mesma magnitude passam a apresentar efeitos mais intensos na superfície, não só pela concentração do fluxo em locais específicos, como os arruamentos, mas também devido à impermeabilização do terreno, em que o tempo de início da ocorrência do evento passa a ser menor e o volume de água maior (Figura 2.1).

A Figura 5.9 apresenta um gráfico onde estão plotados os valores de fluxo acumulado de algumas voçorocas e de locais onde não houve o desenvolvimento de voçorocas, comparando a situação pré e pós-urbanizada (estes pontos estão localizados na Figura 5.8). Nesta área de estudo é possível identificar uma forte correlação do aumento do fluxo acumulado com o desenvolvimento de voçorocas, já nos pontos onde não houve aumento do fluxo acumulado não houve desenvolvimento de voçorocas.

Mesmo com a detecção desses pontos, é possível identificar em campo que outros fatores contribuem para o desenvolvimento e manutenção desses processos erosivos, como a destinação das águas pluviais coletadas na área urbana e despejadas nos canais de drenagem ou outros pontos, sem uma estrutura adequada para tal.

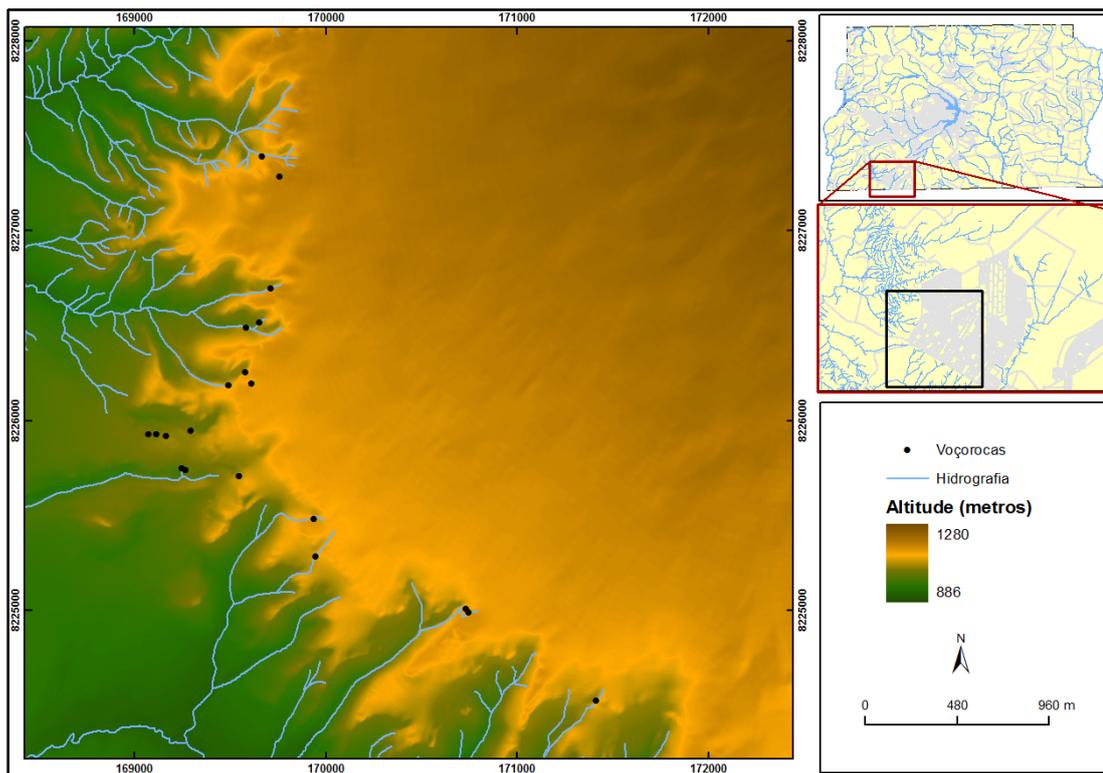


Figura 5.4 - Modelo digital de terreno do Gama (pré-urbanização).

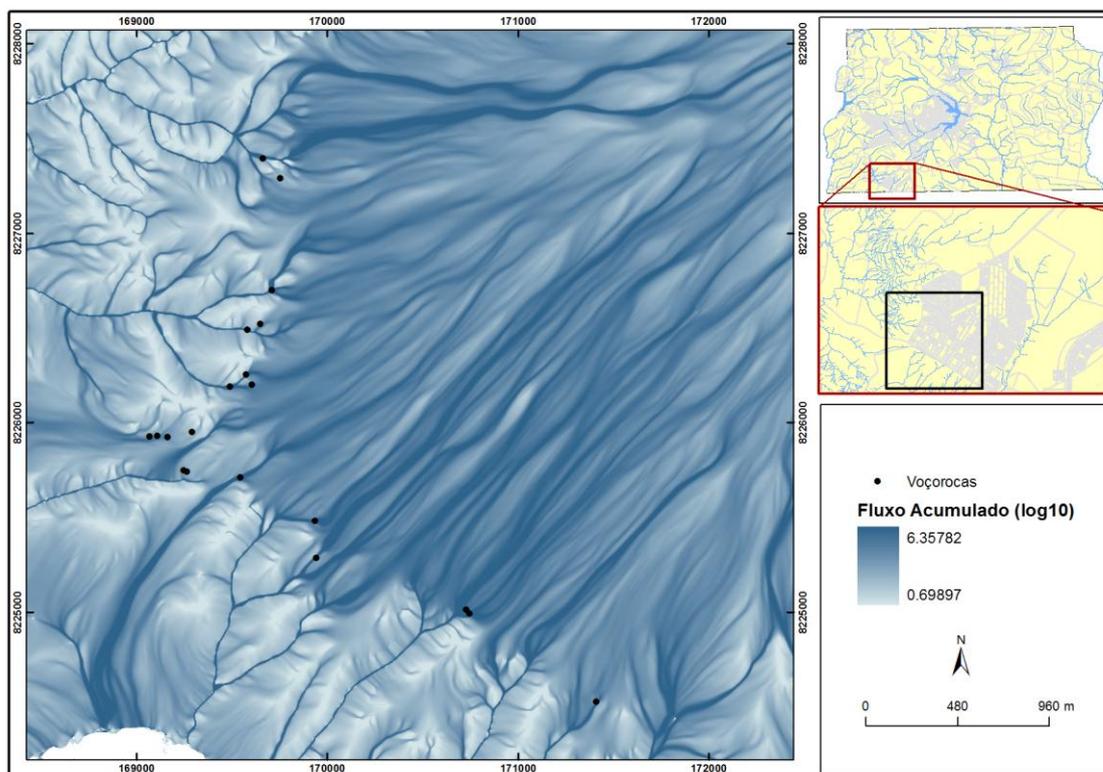


Figura 5.5 – Mapa de fluxo acumulado do Gama (pré-urbanização).

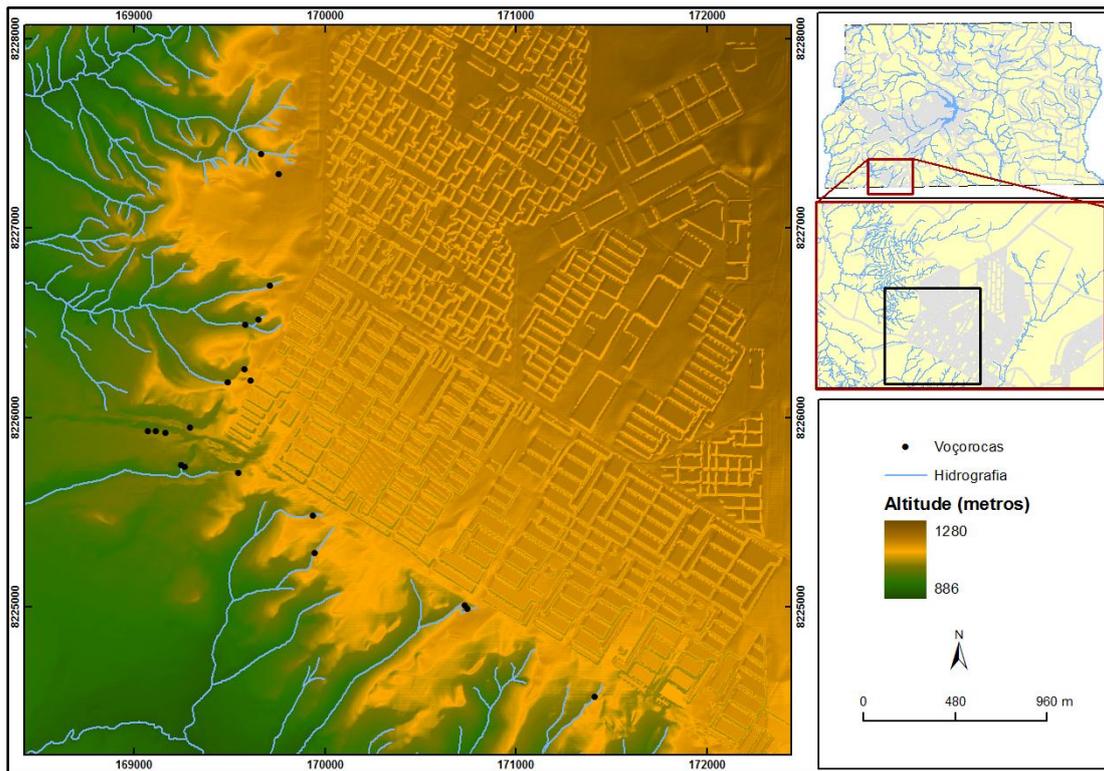


Figura 5.6 – Modelo digital de terreno do Gama (pós-urbanização).

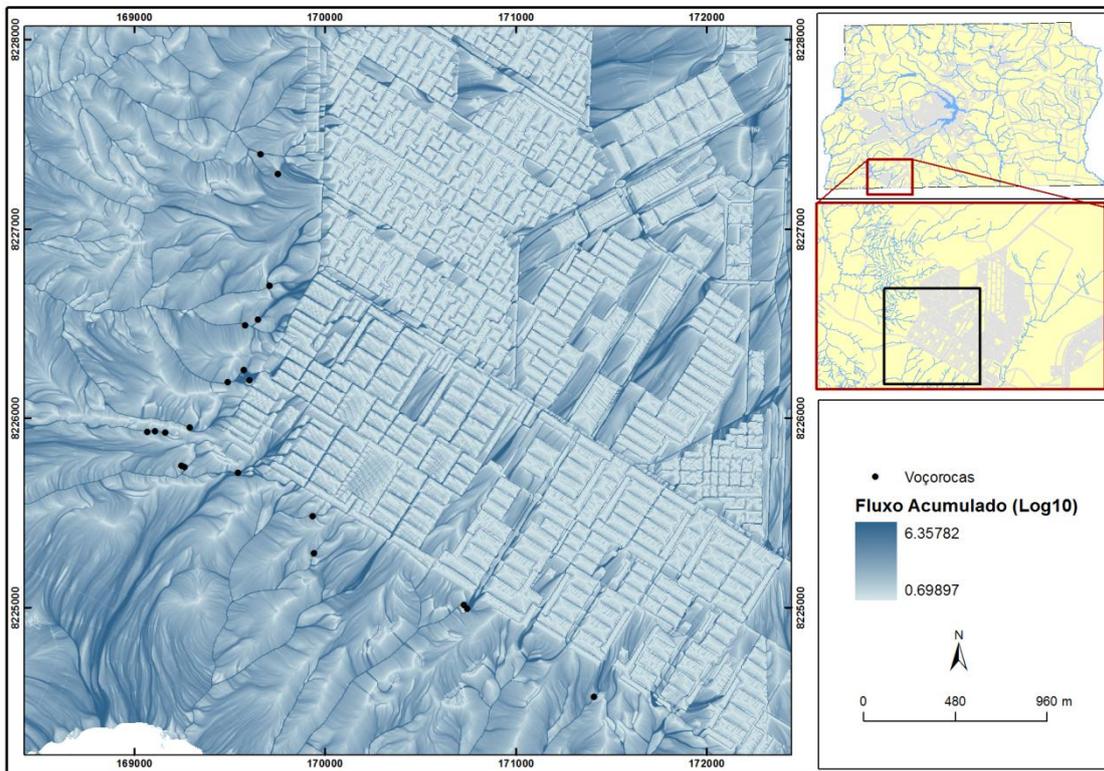


Figura 5.7 – Mapa de fluxo acumulado do Gama (pós-urbanização).

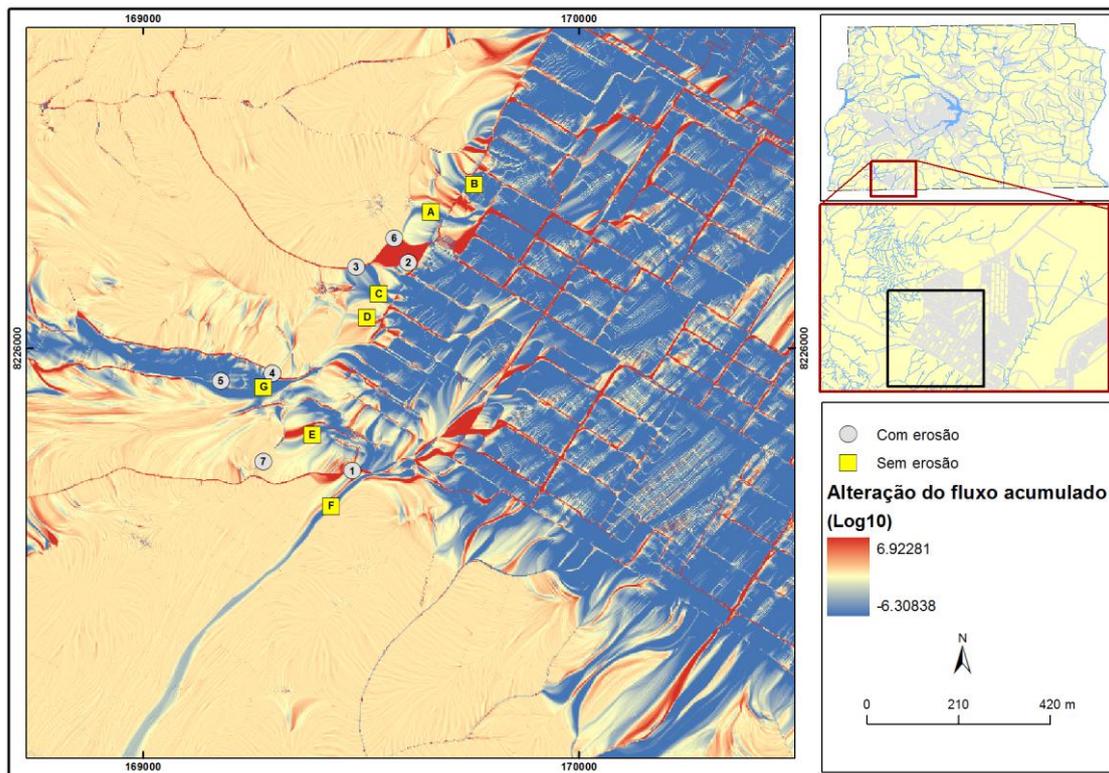


Figura 5.8 – Mapa da alteração do fluxo acumulado no Gama (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). Os círculos representam os pontos que tiveram aumento de fluxo e produziram voçorocas e os quadrados representam os pontos que não apresentaram aumento de fluxo e não produziram voçorocas.

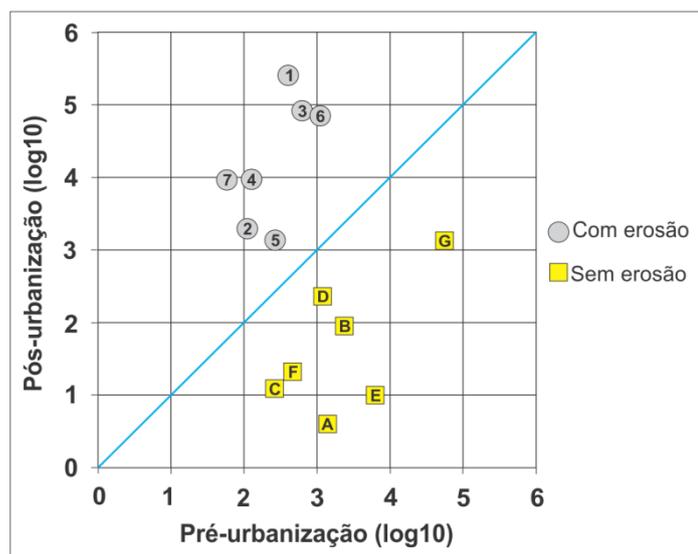


Figura 5.9 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo à pré e pós-urbanização. Os círculos (voçorocas) e os quadrados (não voçorocas) estão também representados na Figura 5.8.

### 5.1.1. Jardim Botânico

Os condomínios do Jardim Botânico se encontram em cima de uma chapada onde as classes de relevo variam de plano a suave ondulado, chegando a ondulado em alguns locais. Essas áreas são cercadas ao leste por classes de declividades de forte ondulado a montanhoso (Figura 5.10), onde o relevo se caracteriza por um forte processo de dissecação, apresentando declividades acentuadas e vales bem definidos (Figuras 5.11).

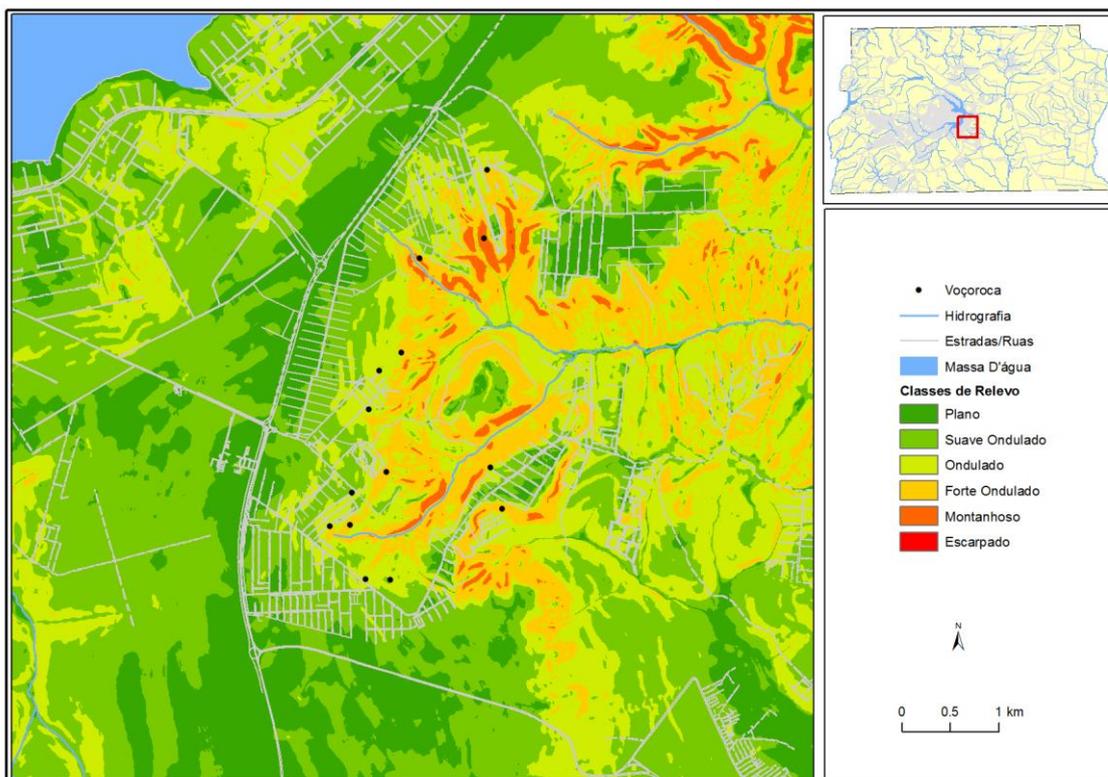


Figura 5.10 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas no Jardim Botânico.

As voçorocas e ravinas estudadas no Jardim Botânico foram identificadas utilizando imagens disponíveis no Google Earth, dos sensores GeoEye e QuickBird. Devido à cobertura temporal desta área, que tem algumas imagens entre 2003 e 2011, foi possível verificar o desenvolvimento de algumas ravinas/voçorocas em decorrência das alterações feitas com a consolidação da área urbana e em alguns casos acompanhar a sua recuperação (Figura 5.12 e 5.13).

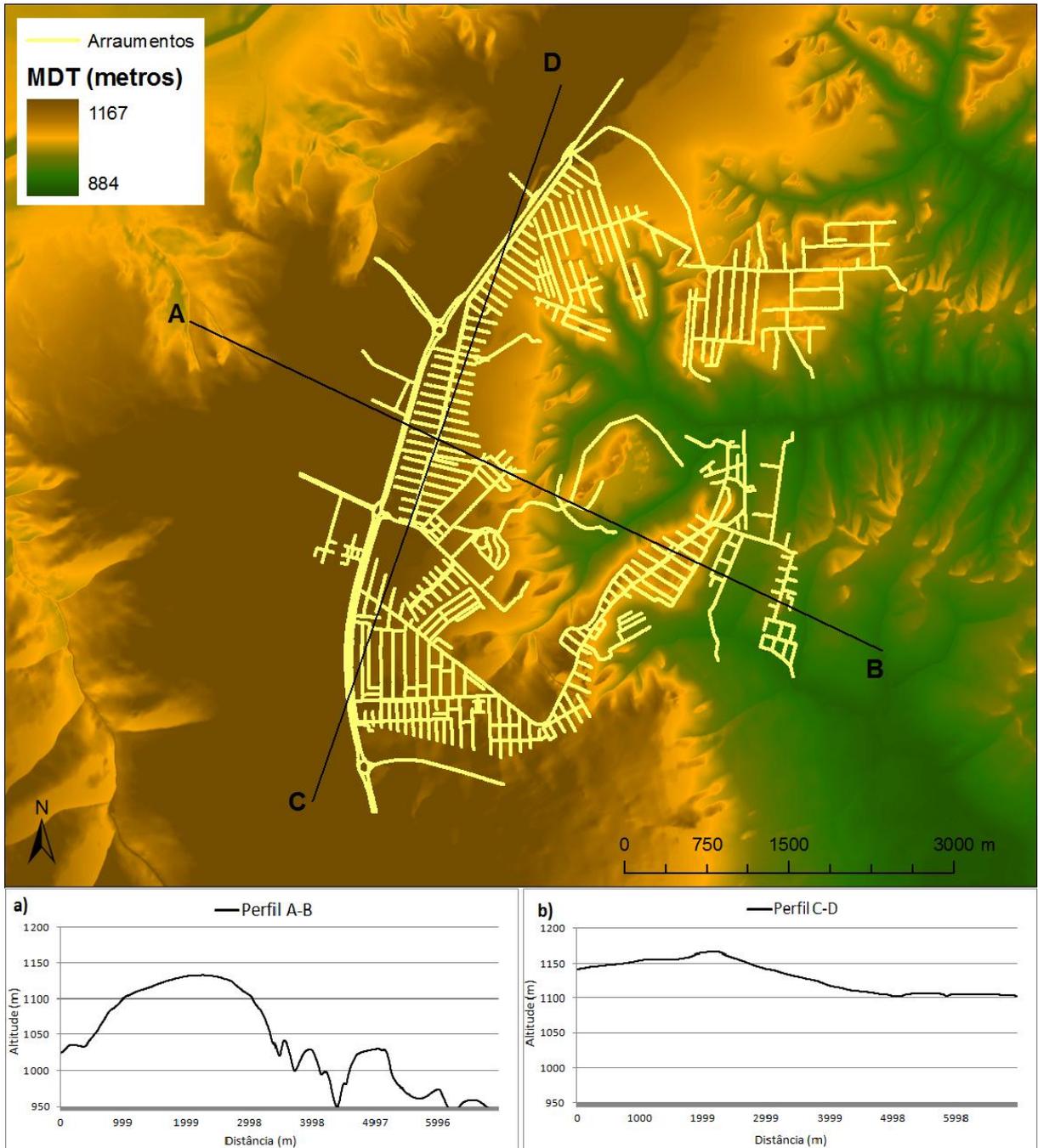


Figura 5.11 – Perfis topográficos da área do Jardim Botânico. Apenas o perfil AB mostra a ruptura de declive entre a chapada e o vale dissecado, o perfil CD acompanha a chapada.

Foram identificadas sete ravinas/voçorocas que aparentam ligação com a estrutura urbana. Contudo, não é possível ter certeza da real causa da origem de algumas ravinas/voçorocas, mas, é possível que a instalação da área urbana esteja contribuindo para seu desenvolvimento, seja pela falta de obras de drenagem, ou mesmo pelo destino incorreto das águas drenadas.

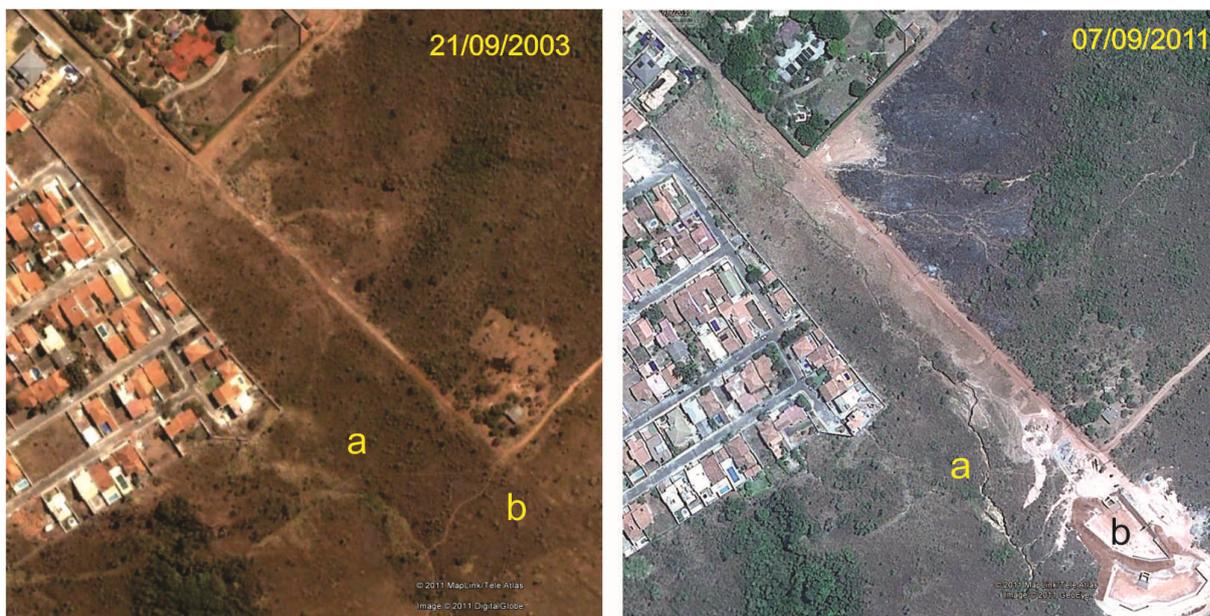


Figura 5.12 – a) Desenvolvimento de uma ravina; e b) construção de equipamentos de coleta de águas pluviais para desviar o fluxo que estava ocasionando a erosão (a).



Figura 5.13 – Fotografia a partir da bacia de contenção apresentada na Figura 5.12b.

O terreno pré-urbanizado (Figura 5.14) é composto por uma chapada que se estende no sentido SW – NNE, tendo ao leste uma depressão causada por um processo de dissecação. Quando comparado a Figura 5.14 com a Figura 3.2 nota-se que a disposição da chapada (amarelo) e da depressão (verde) estão associadas ao contato geológico dos Grupos Paranoá (chapada) e Canastra (depressão).

Com isso o fluxo acumulado na região da chapada se apresenta de forma bem distinta do que na área de dissecação, onde, na primeira há um escoamento difuso e à medida que se aproxima da região de dissecação passa para um padrão de escoamento bem definido (Figura 5.15), onde ocorrem as declividades mais acentuadas (Figura 5.10).

Na configuração pré-urbana o volume imediato do fluxo tende a ser menor, pois, se distribui ao longo de um determinado tempo e com um pequeno atraso em relação ao início do evento pluvial (Figura 2.1). Entretanto, não se exclui a possibilidade da ocorrência de processos erosivos vinculados a eventos naturais extremos, pois, como dito por Christofolletti (1980) a geometria do modelado é o produto do ajustamento entre materiais e processos e esta área apresenta grande suscetibilidade à ocorrência desses processos.

A partir do momento que a superfície passou por alterações em sua forma (terraplanagem, escavações, aterros, construções de edificações, arruamentos, etc.) outra dinâmica passou a atuar, pois, com o solo parcialmente impermeabilizado o escoamento superficial se tornou mais atuante e passou a percorrer caminhos diferentes dos naturais. O MDT pós-urbanizado simula essa nova condição da forma (Figura 5.16).

Com base nessa nova configuração o mapa de fluxo acumulado também é alterado, apresentando padrões bem diferentes do anterior, conforme mostrado na Figura 5.17. No caso dos condomínios do Jardim botânico a impermeabilização não é tão severa como em outras áreas, pois, quase todas as casas mantêm uma área verde no terreno. Mesmo assim, as alterações no terreno já são suficientes para fazer aumentar o fluxo em áreas que naturalmente são sensíveis a ocorrência de erosões e tendem a desenvolver o processo.

Ao comparar os mapas de Fluxo Acumulado da área pós-urbanizada com a pré-urbanizada (Figura 5.18) são identificadas as áreas onde ocorreu aumento do fluxo acumulado, apresentadas em vermelho. Essa identificação é que aponta o potencial de ocorrência de voçorocas decorrente da alteração superficial do terreno.

O gráfico da Figura 5.19 apresenta os pontos com valores de fluxo acumulado pré e pós-urbanização, onde os quadrados mostram áreas que não desenvolveram ravinas/voçorocas e nos círculos áreas que desenvolveram ravinas/voçorocas, esses pontos estão localizados na Figura 5.18.

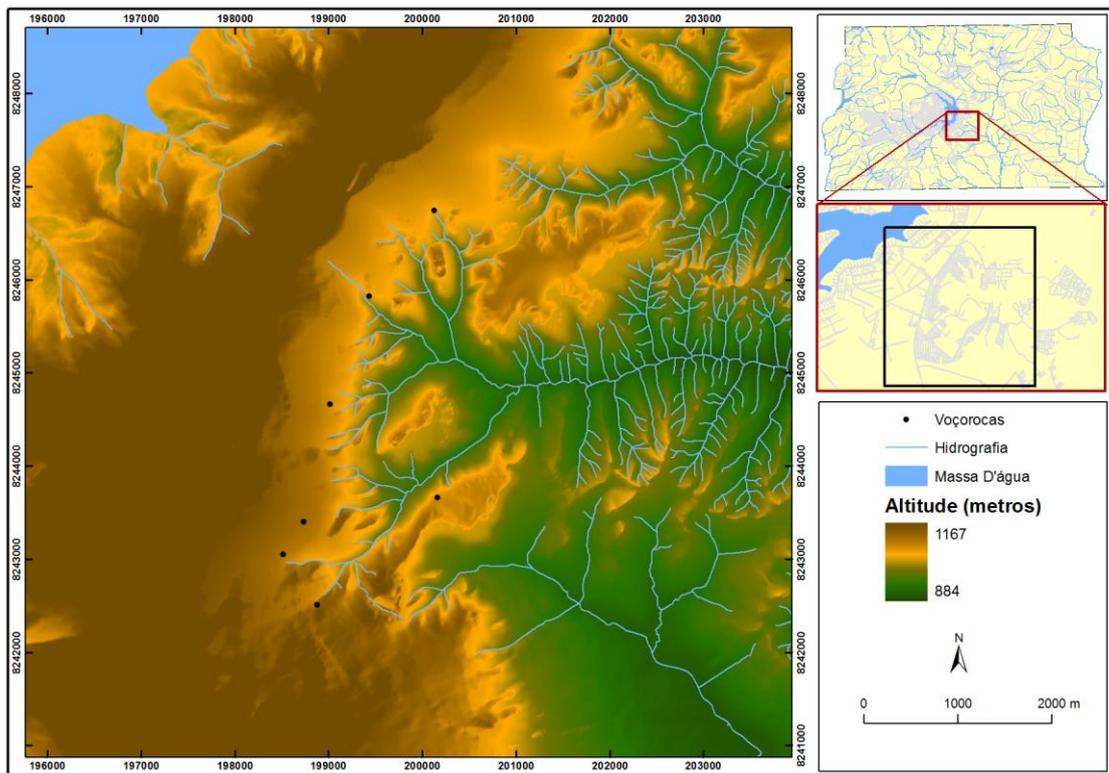


Figura 5.14 – Modelo digital de terreno do Jardim Botânico (pré-urbanização).

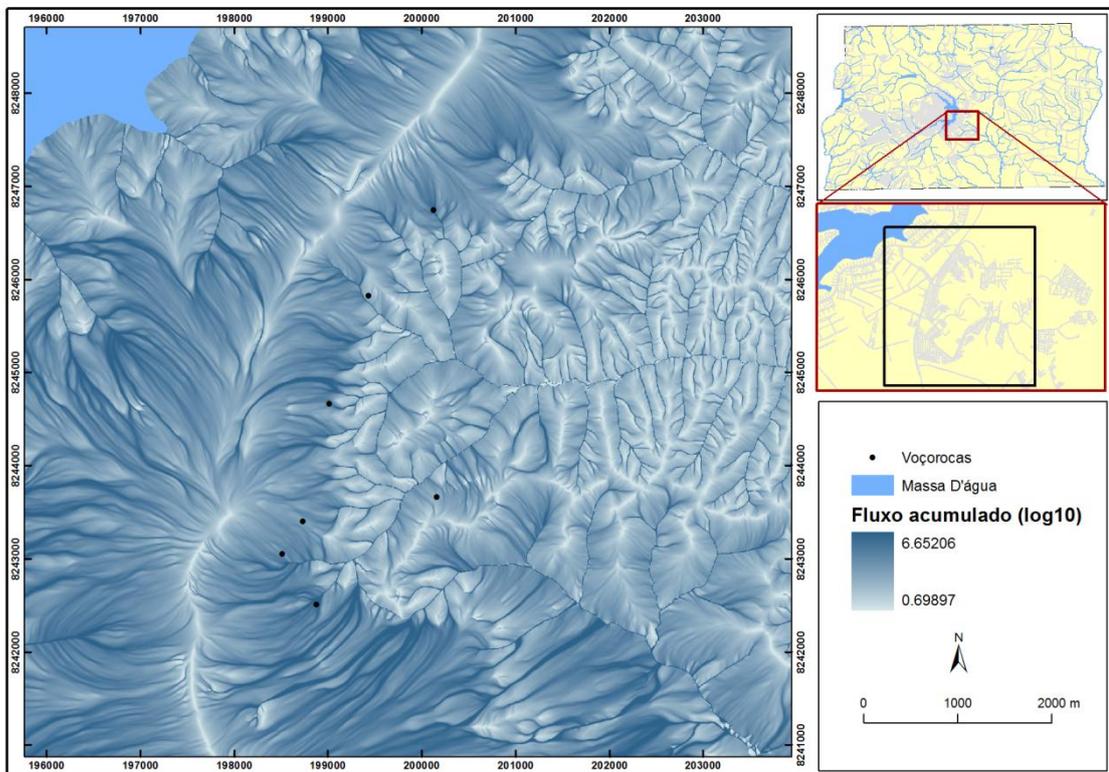


Figura 5.15 – Mapa de fluxo acumulado do Jardim Botânico (pré-urbanização).

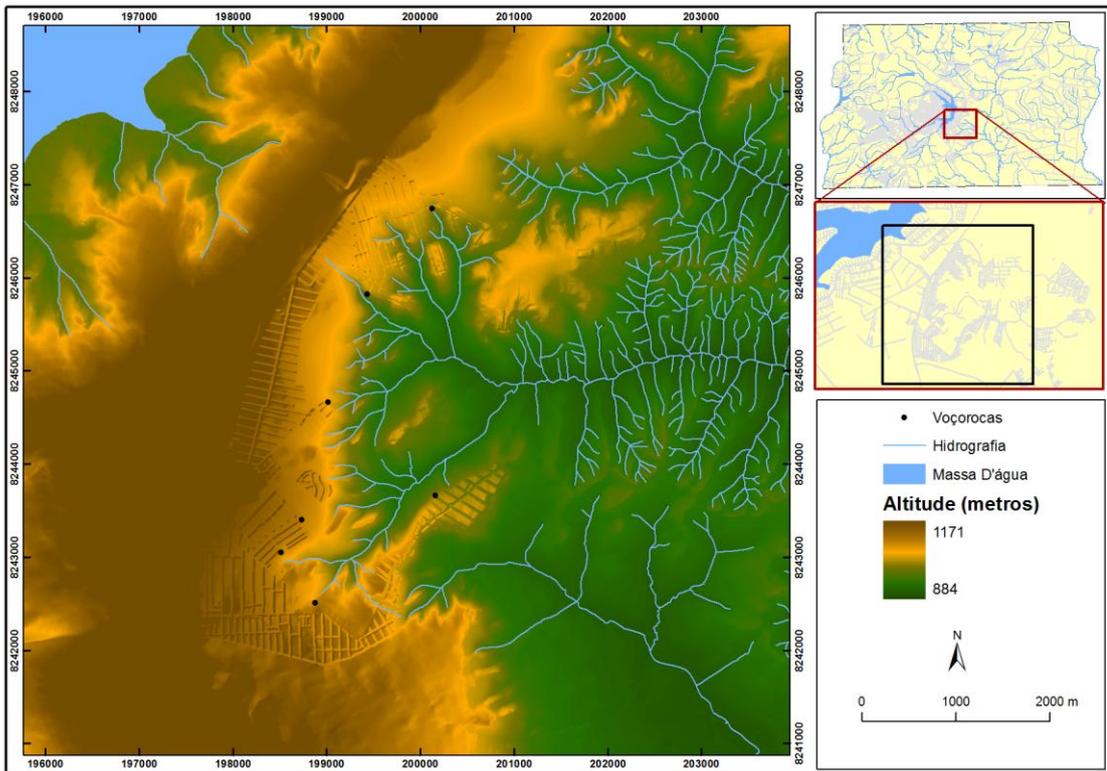


Figura 5.16 – Modelo digital de terreno do Jardim Botânico (pós-urbanização).

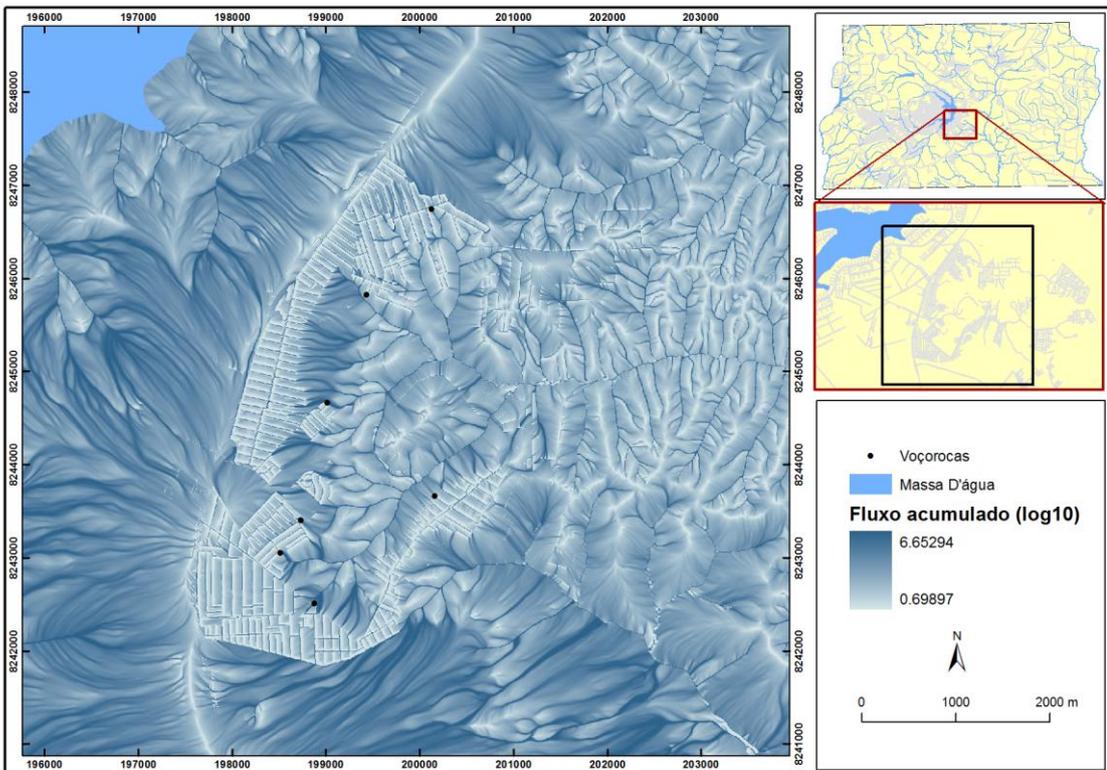


Figura 5.17 - Mapa de fluxo acumulado do Jardim Botânico (pós-urbanização).

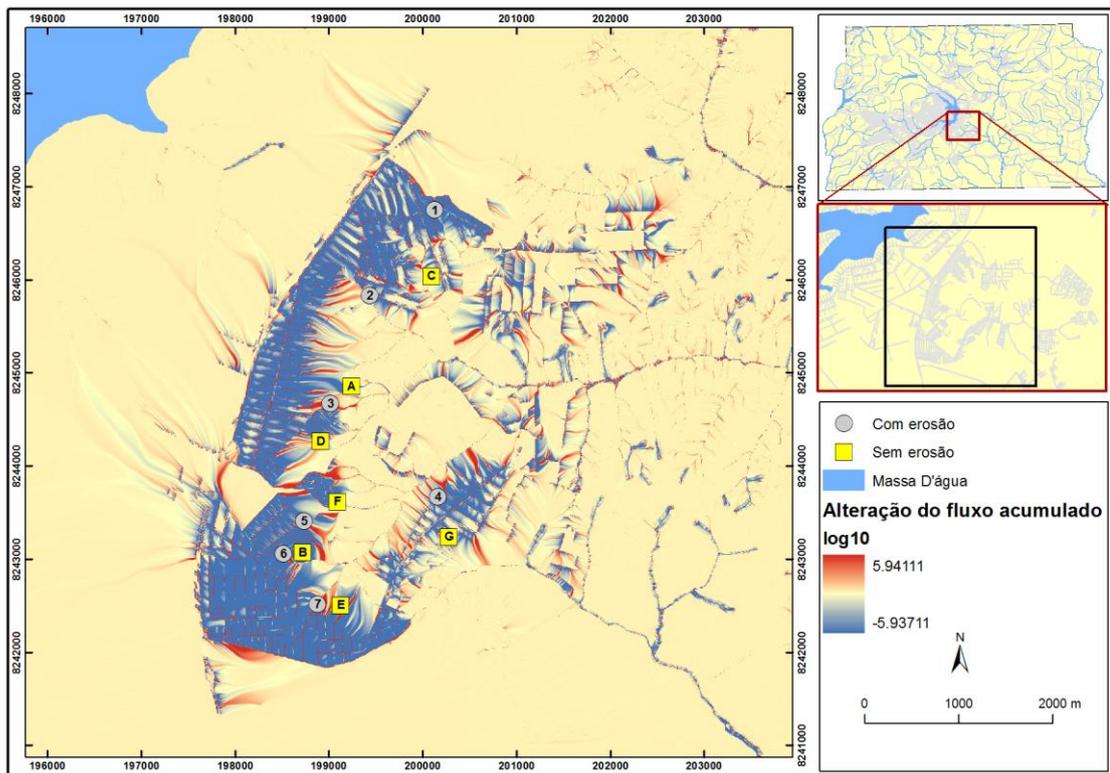


Figura 5.18 – Mapa da alteração do fluxo acumulado no Jardim Botânico (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). Os círculos representam os pontos que tiveram aumento de fluxo e produziram ravinas/voçorocas e os quadrados representam os pontos que não apresentaram aumento de fluxo e não produziram ravinas/voçorocas.

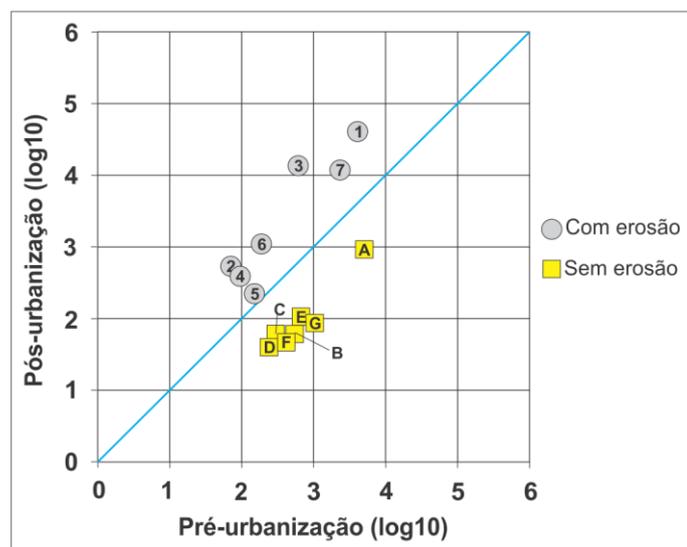


Figura 5.19 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo a pré e pós urbanização. Os círculos (ravinas/voçorocas) e os quadrados (não ravinas/voçorocas) estão também representados na Figura 5.18.

### 5.1.2. Ceilândia

A Ceilândia, assim como as outras áreas está em cima de uma chapada, na qual as classes relevo vão de plano a suave ondulado. O terreno ao norte da BR-070 apresenta classes de relevo que vão de suave ondulado a ondulado. Em alguns locais, mais próximo ao ribeirão das Pedras, aparece como forte ondulado e eventualmente como montanhoso (Figura 5.20).

Para esta área foram selecionadas 11 voçorocas, todas estão ao longo da BR-070, que margeia a cidade ao norte. A região da Ceilândia é caracterizada por uma chapada, onde em seu centro apresenta as maiores altitudes que vão diminuindo para a periferia, exceto na direção SE em que o terreno tende a manter o mesmo nível de altitude (Figura 5.21).

A região de ocorrência das voçorocas não apresenta grandes valores de declividade e a situação do terreno é um pouco diferente das duas áreas apresentadas anteriormente, pois o vale do ribeirão das Pedras não apresenta o mesmo grau de dissecação dos vales do Gama e do Jardim Botânico.

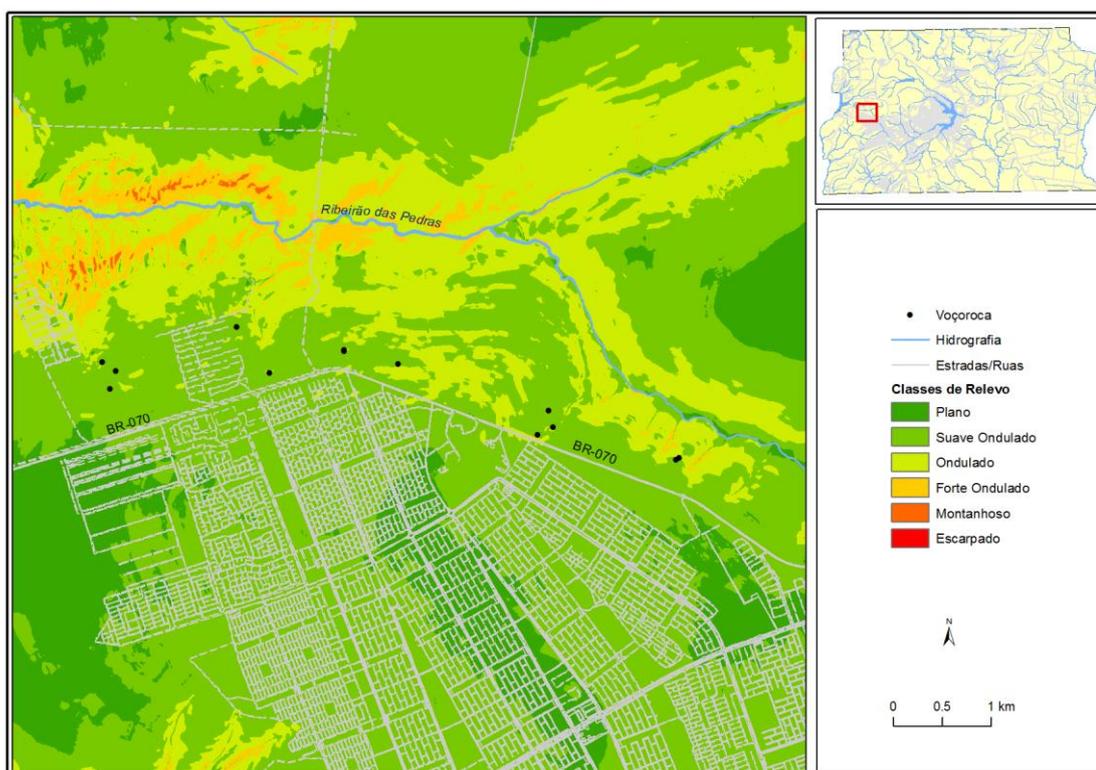


Figura 5.20 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas na Ceilândia.

O MDT pré-urbanizado desta área (Figura 5.22) pode ser melhor compreendido quando analisado em conjunto com o mapa de fluxo acumulado (Figura 5.23), pois é uma área mais plana que as outras, não apresentando declives tão acentuados em seu entorno. Com isso, o padrão do fluxo acumulado tende a ser difuso em quase toda área, havendo concentração apenas nas proximidades dos canais de drenagem localizados no vale.

Assim como nas outras áreas, o terreno pós-urbanizado, apresenta intervenções que modificaram consideravelmente a dinâmica hidrológica superficial em decorrência da instalação de arruamentos e edificações (Figura 5.24).

Com as alterações no terreno, o fluxo tende a se concentrar em canais artificiais condicionados pelos arruamentos, resultando em um mapa de fluxo acumulado bem diferente do pré-urbanizado, como mostrado na Figura 5.25. Porém, ao confeccionar o mapa, da Figura 5.26, que mostra a alteração do fluxo acumulado (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré-urbanizado e o pós-urbanizado), foi identificado que apenas uma das voçorocas coincidiu com uma das áreas onde houve concentração do fluxo (círculo de número 6 da Figura 5.26)

Por imagens de satélite (Figura 5.27) e em campo (Figura 5.28) é possível ver que existe na área de estudo algumas estruturas componentes do sistema de drenagem de águas pluviais e que descarregam abaixo da BR-070, sendo uma possível fonte da concentração do fluxo.



Figura 5.21 – Perfis topográficos da área da Ceilândia. Ambos mostram que não há ruptura de declive acentuada entre a chapada e o vale.

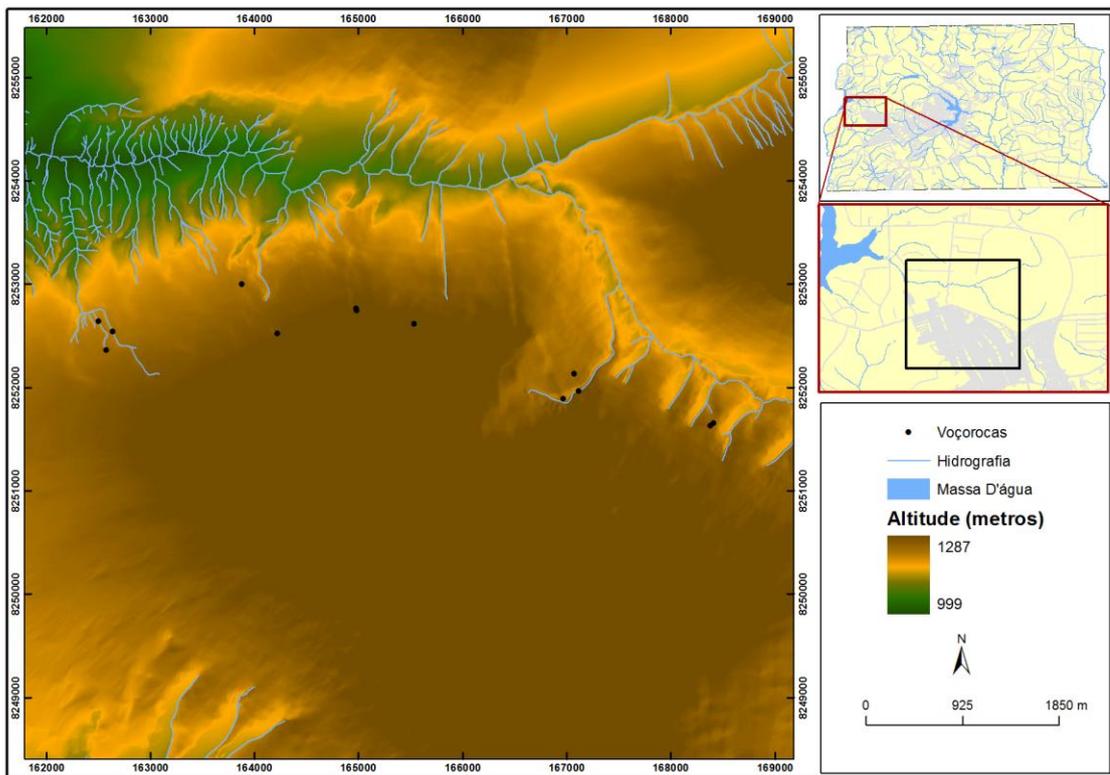


Figura 5.22 – Modelo digital de terreno da Ceilândia (pré-urbanização).

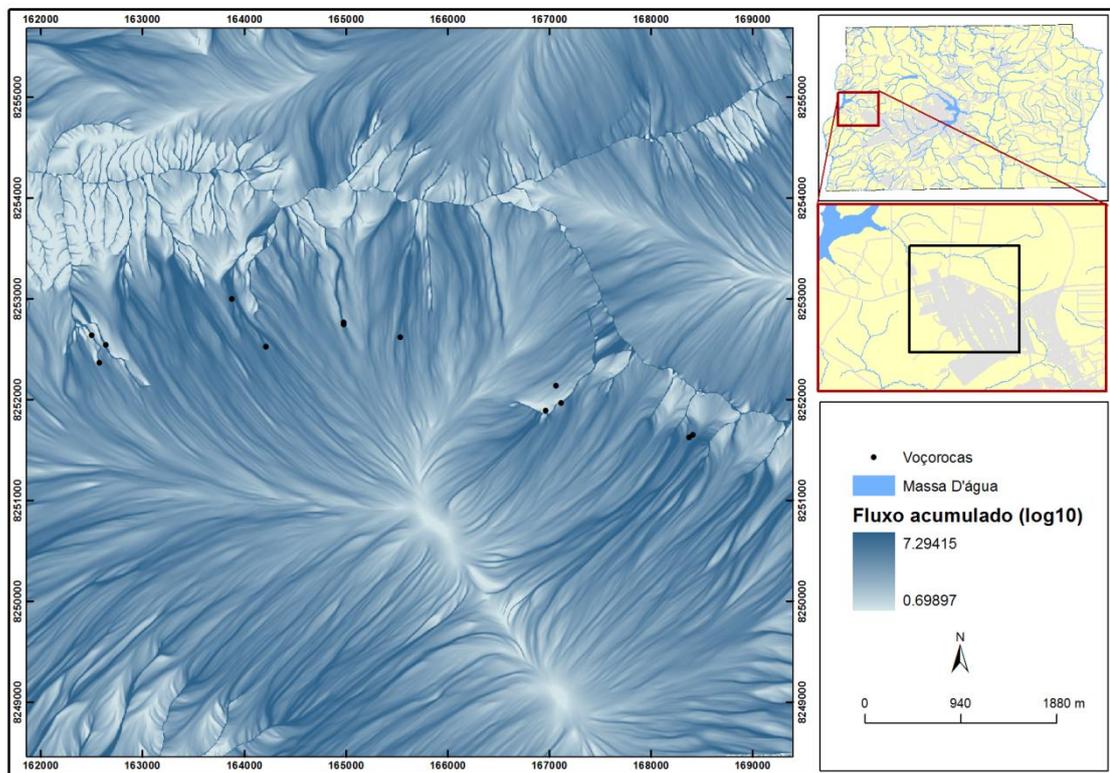


Figura 5.23 – Mapa de fluxo acumulado da Ceilândia (pré-urbanização).

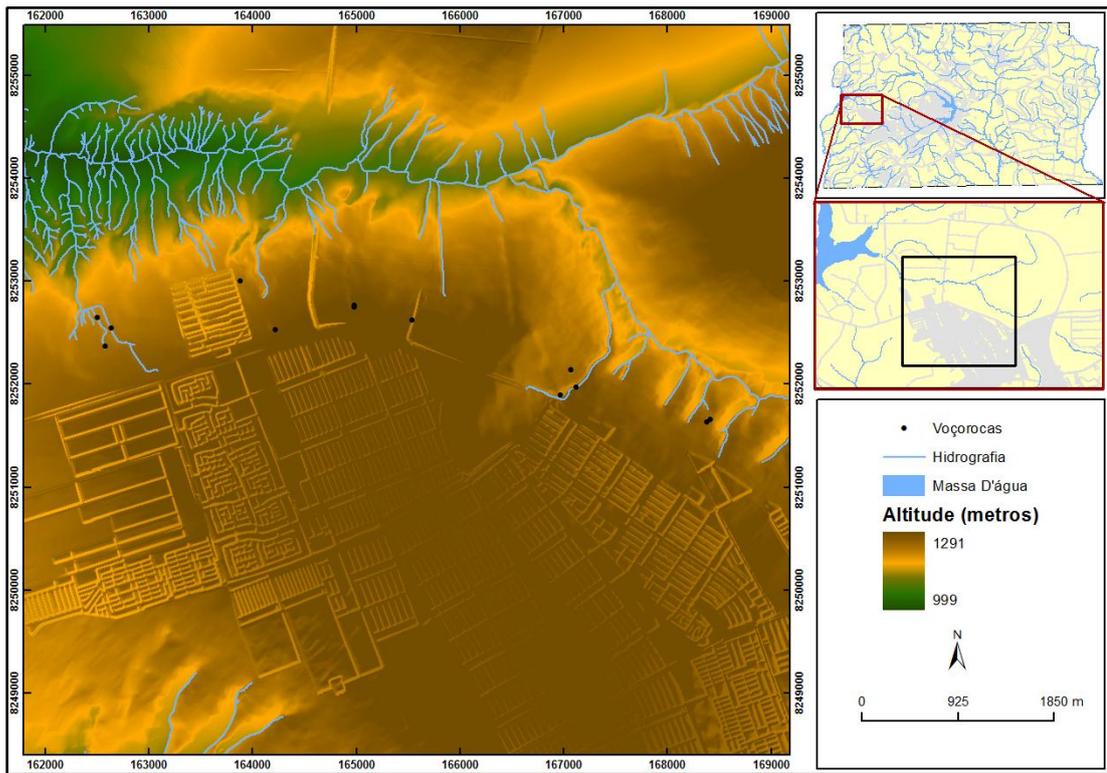


Figura 5.24 – Modelo digital de terreno da Ceilândia (pós-urbanização).

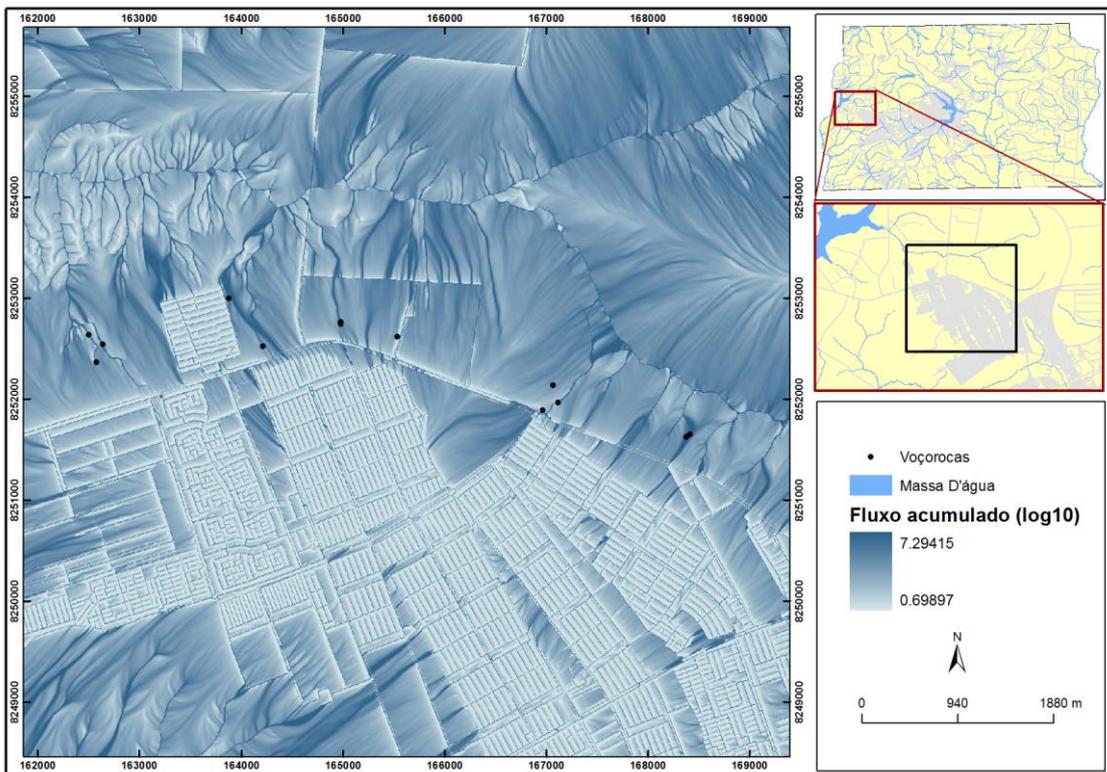


Figura 5.25 – Mapa de fluxo acumulado da Ceilândia (pós-urbanização).

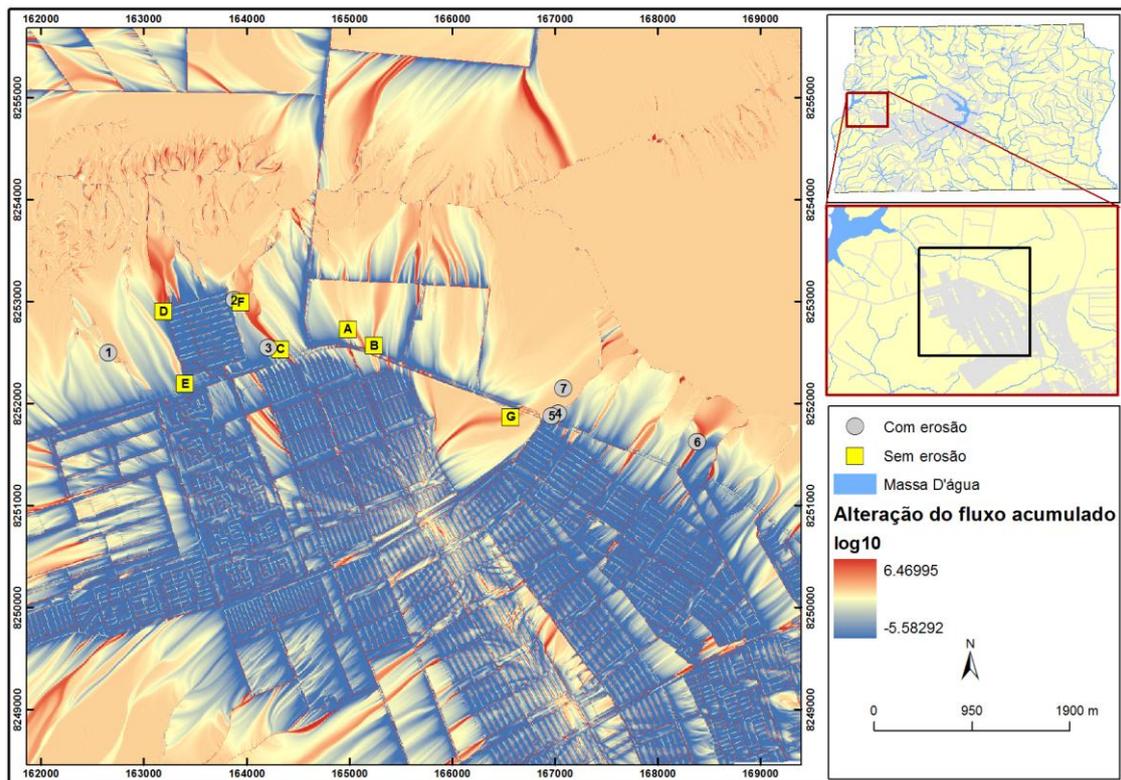


Figura 5.26 – Mapa da alteração do fluxo acumulado na Ceilândia (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). No caso da Ceilândia os pontos onde foram identificadas voçorocas (círculos) não apresentaram aumento do fluxo acumulado, exceto o círculo 6. E os pontos onde houve aumento de fluxo não apresentam voçorocas.

O mapa da alteração do fluxo acumulado na superfície urbana não apresentou resultados conclusivos da influência desta no desenvolvimento das voçorocas, pelo menos no tocante a concentração do fluxo, apenas, pelos arruamentos.

A Figura 5.29 apresenta um gráfico onde estão plotados os valores de fluxo acumulado de algumas voçorocas (círculos) e de locais onde não houve o desenvolvimento de voçorocas (quadrados), comparando a situação pré e pós-urbanizada (estes pontos estão localizados na Figura 5.26). Por esse gráfico é possível identificar uma inversão dos pontos em relação ao fluxo acumulado.



Figura 5.27 – Estruturas do sistema de drenagem de águas pluviais. No destaque (a) parte da estrutura de coleta das águas pluviais, (b) estrutura para descarga da água coletada e (c) estrutura da adutora da CAESB.



Figura 5.28 – Foto a) mostra o detalhe da Figura 5.27b em campo; foto b) apresenta estrutura de coleta de águas pluviais que fica no canteiro central da BR-070, similar ao do detalhe na Figura 5.27a.

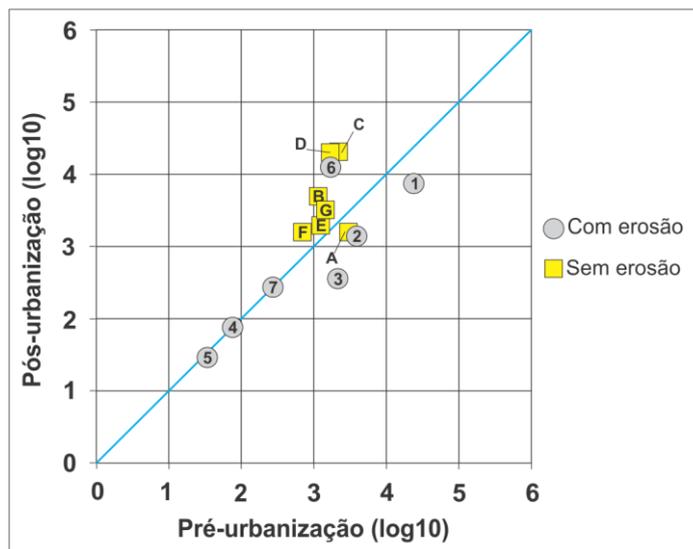


Figura 5.29 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo a condição pré e pós urbanização. Os círculos (com erosões) e os quadrados (sem erosões) estão também representados na Figura 5.26. Nessa área houve uma inversão dos pontos com ocorrência de erosões e aumento do fluxo acumulado.

### 5.1.3. Incra 8

O Incra 8 está assentado em uma área com declividade que varia de plano a suave ondulado, margeada pela classe de relevo classificada como ondulado sendo que a voçoroca se encontra praticamente nesta última (Figura 5.30). O terreno desta área não apresenta declividades muito acentuadas nem vales de dissecação (Figura 5.31).

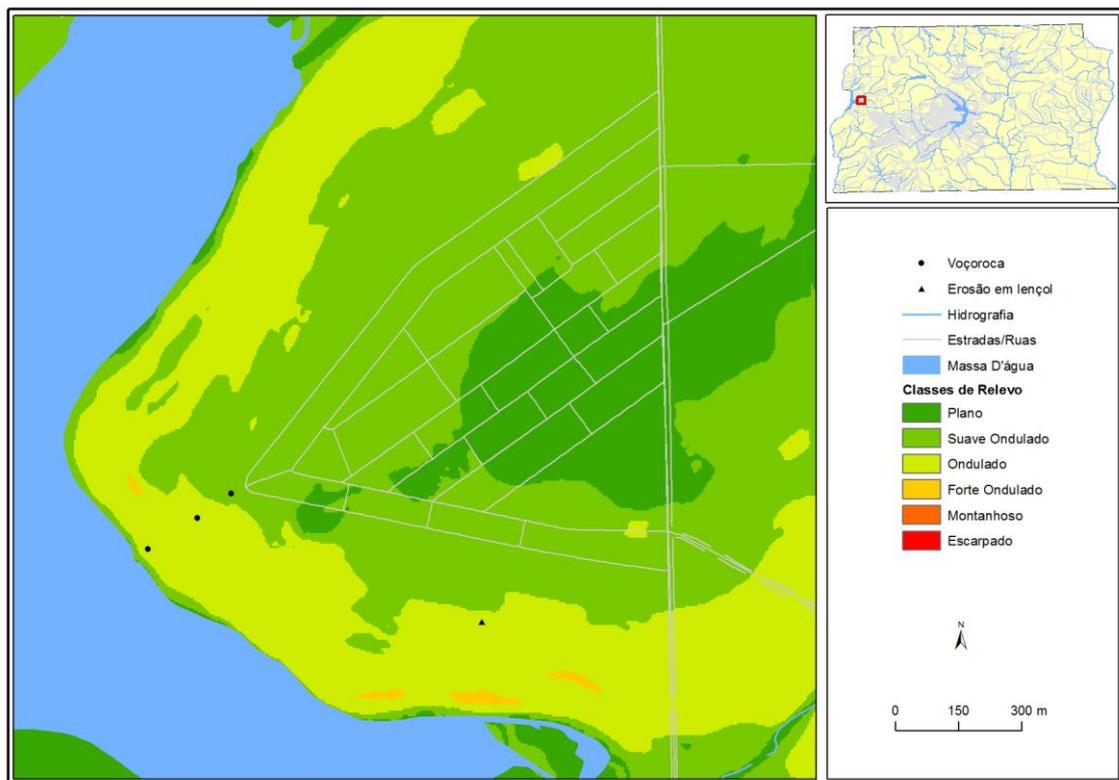


Figura 5.30 – Mapa de classes de relevo e localização das voçorocas estudadas no Incria 8.

Pelas características do MDT pré-urbanizado (Figura 5.32), não há concentração de fluxo em canais bem definidos. Este terreno apresenta um escoamento difuso (Figura 5.33).

A alteração da dinâmica nesta área é bem evidente, pois, os arruamentos formam um desenho triangular que converge todo o fluxo para o vértice posicionado na porção sudoeste da (Figura 5.34). Essa configuração do terreno e dos arruamentos contribuiu significativamente para a ocorrência da voçoroca, pois quase todo o fluxo foi direcionado para um único ponto (Figura 5.35 e 5.36).

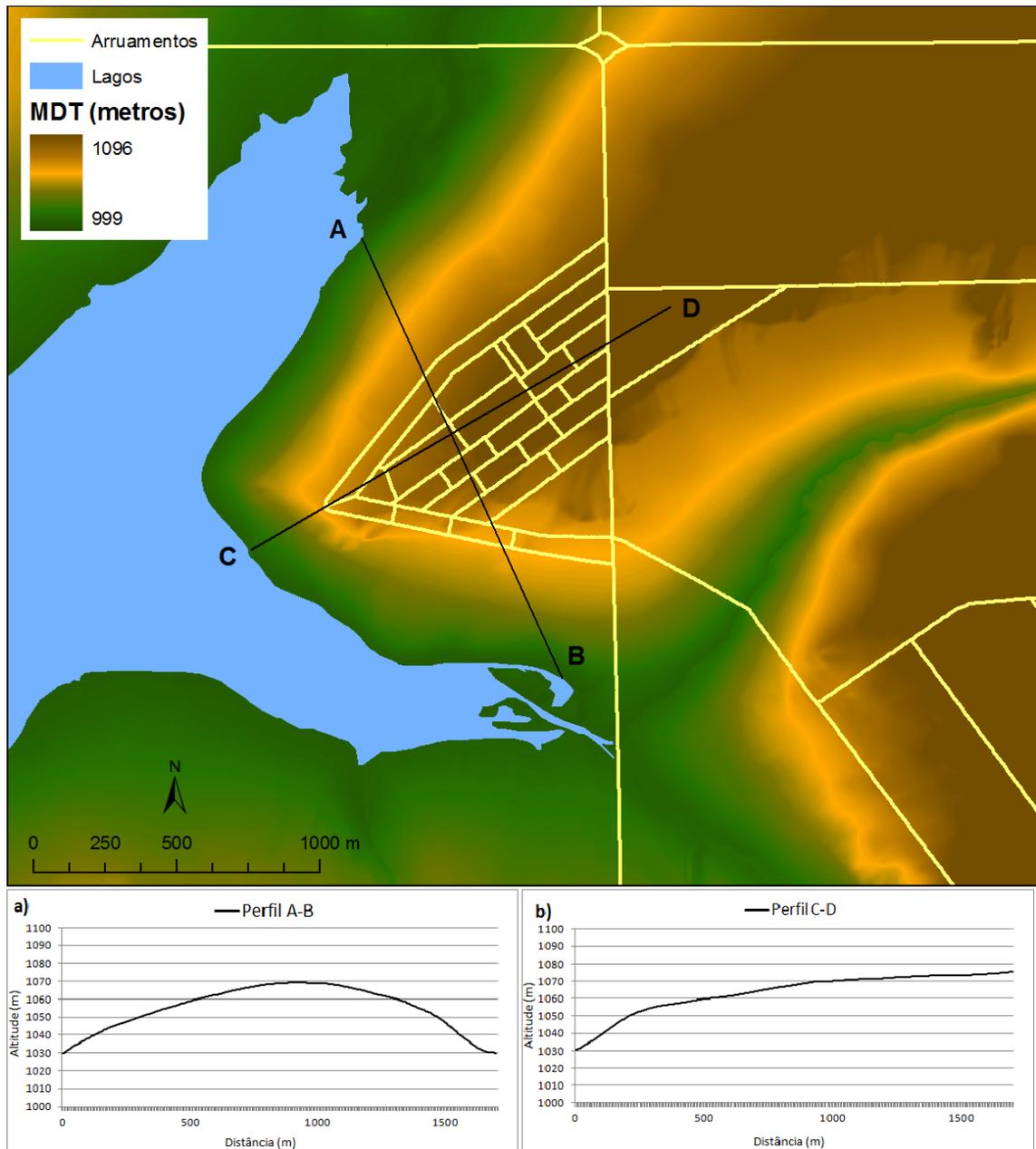


Figura 5.31 – Perfis topográficos da área do Inca 8. Ambos mostram a convexidade deste terreno, que apresenta declividades pouco acentuadas.

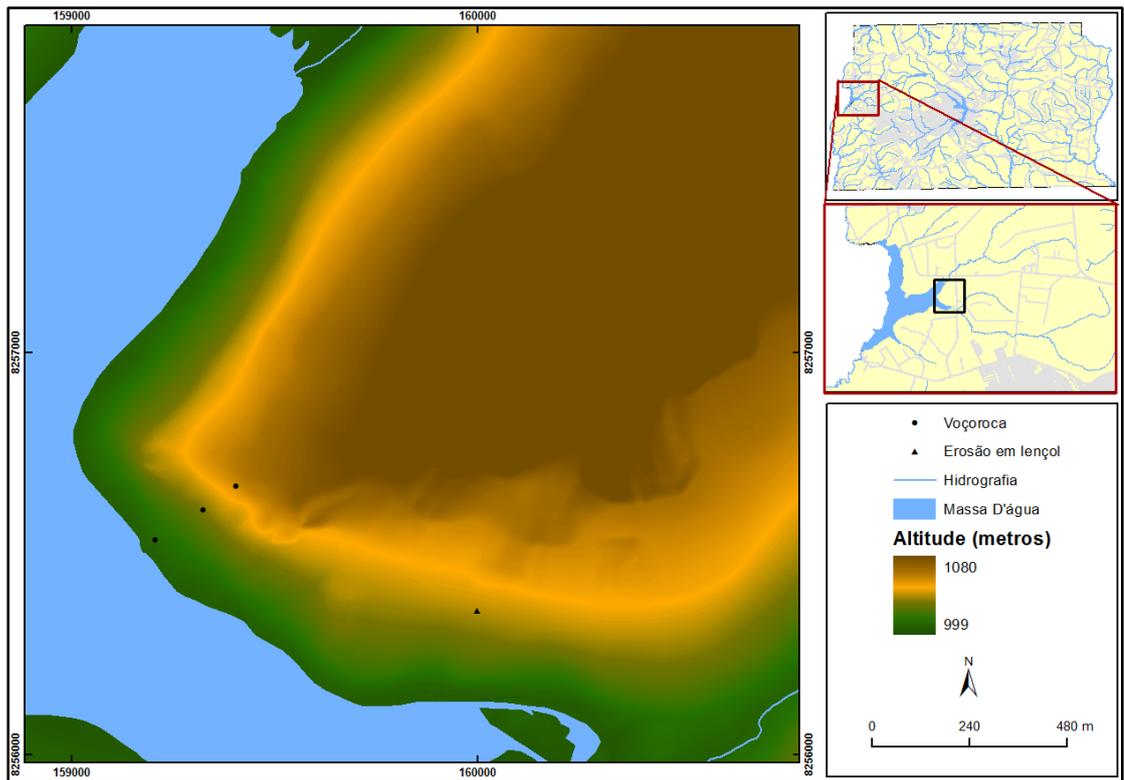


Figura 5.32 – Modelo digital de terreno do Inkra 8 (pré-urbanização).

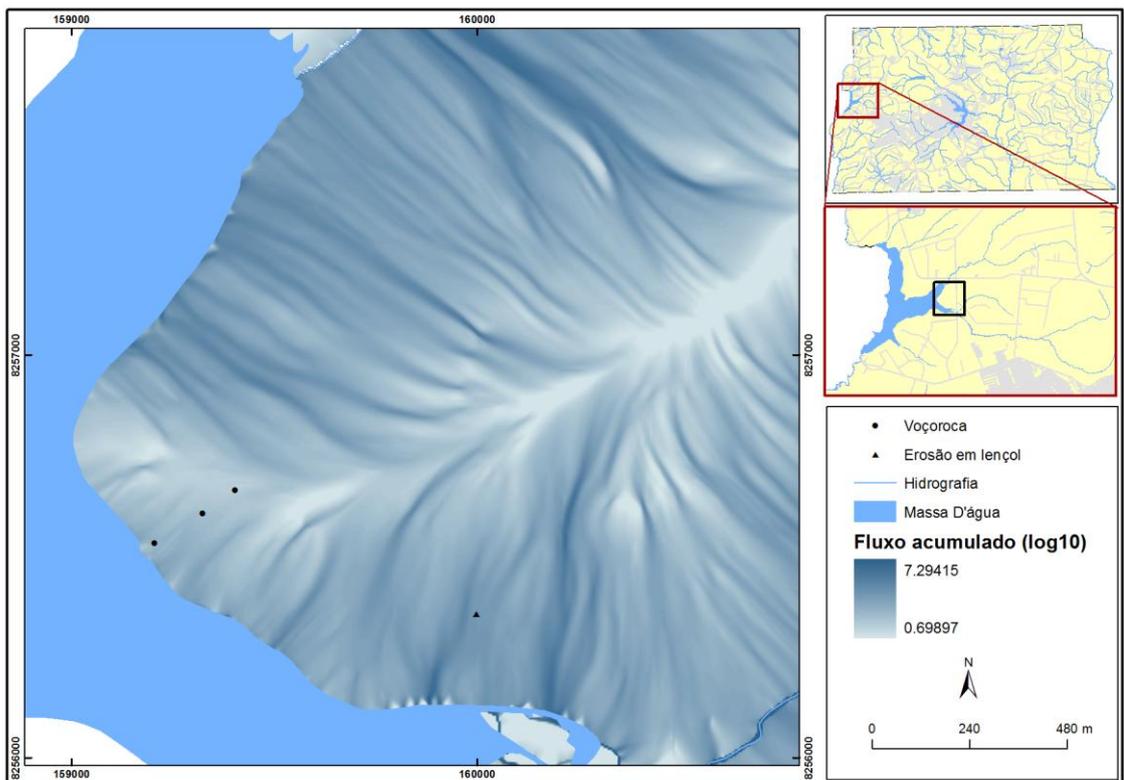


Figura 5.33 – Mapa de fluxo acumulado do Inkra 8 (pré-urbanização).

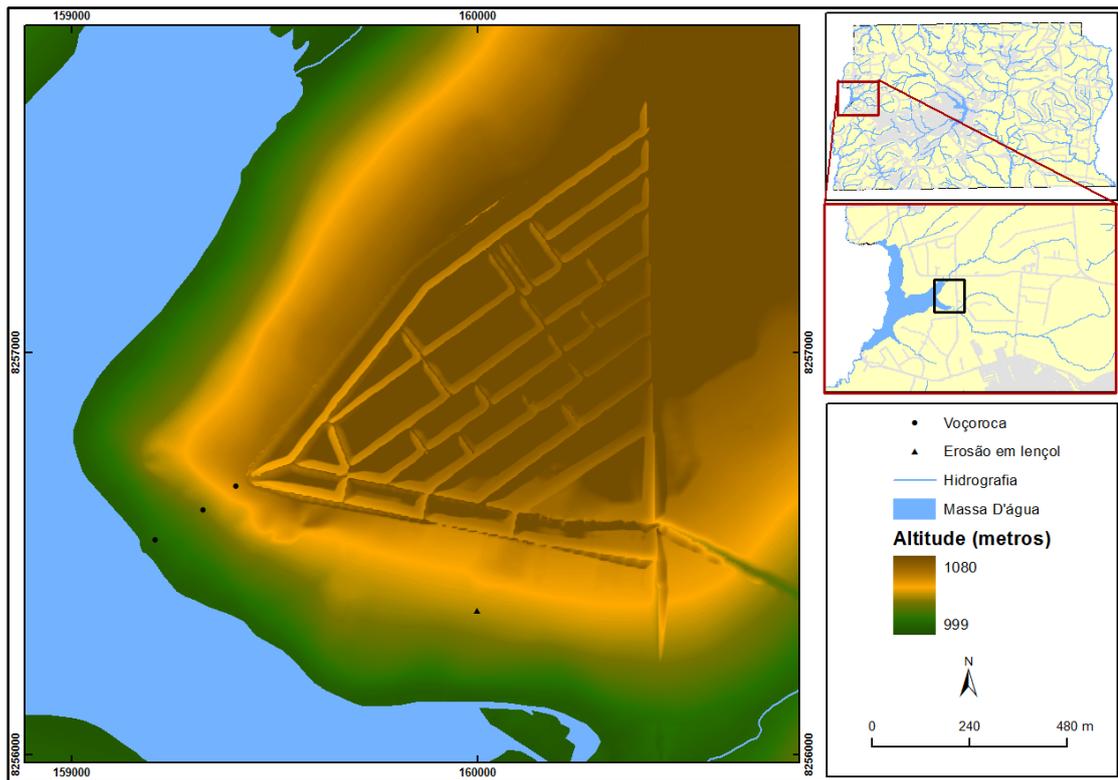


Figura 5.34 – Modelo digital de terreno do Inkra 8 (pós-urbanização).

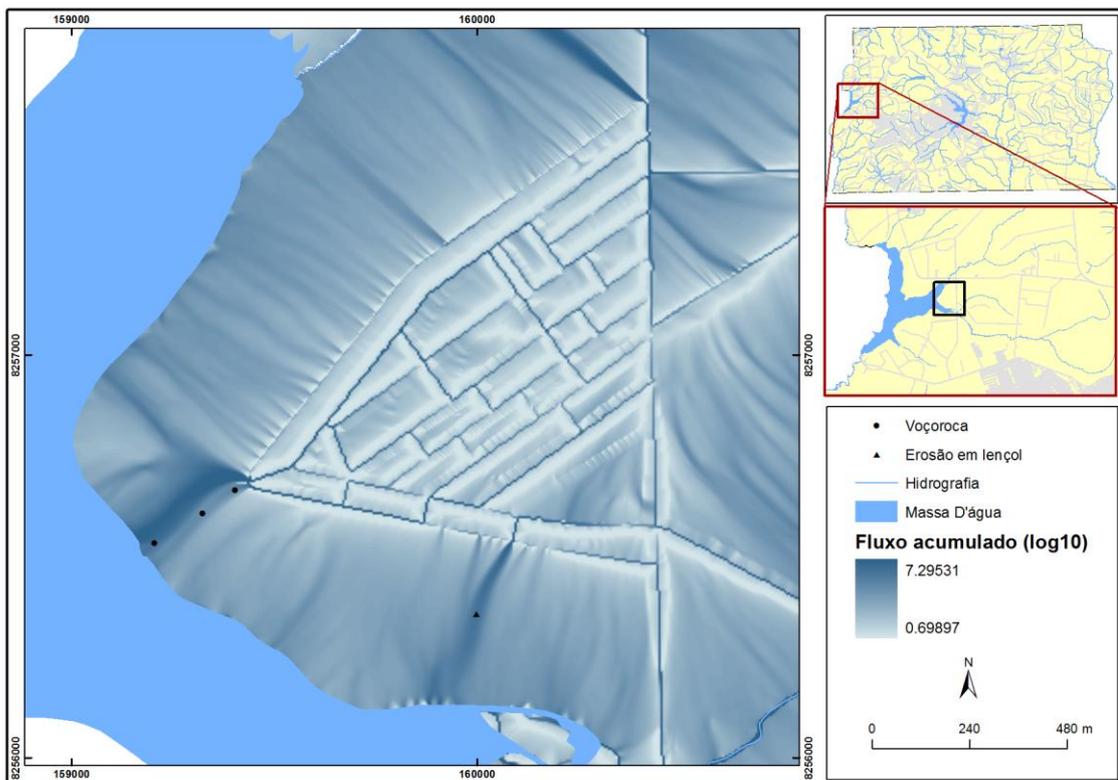


Figura 5.35 – Mapa de fluxo acumulado do Inkra 8 (pós-urbanização).

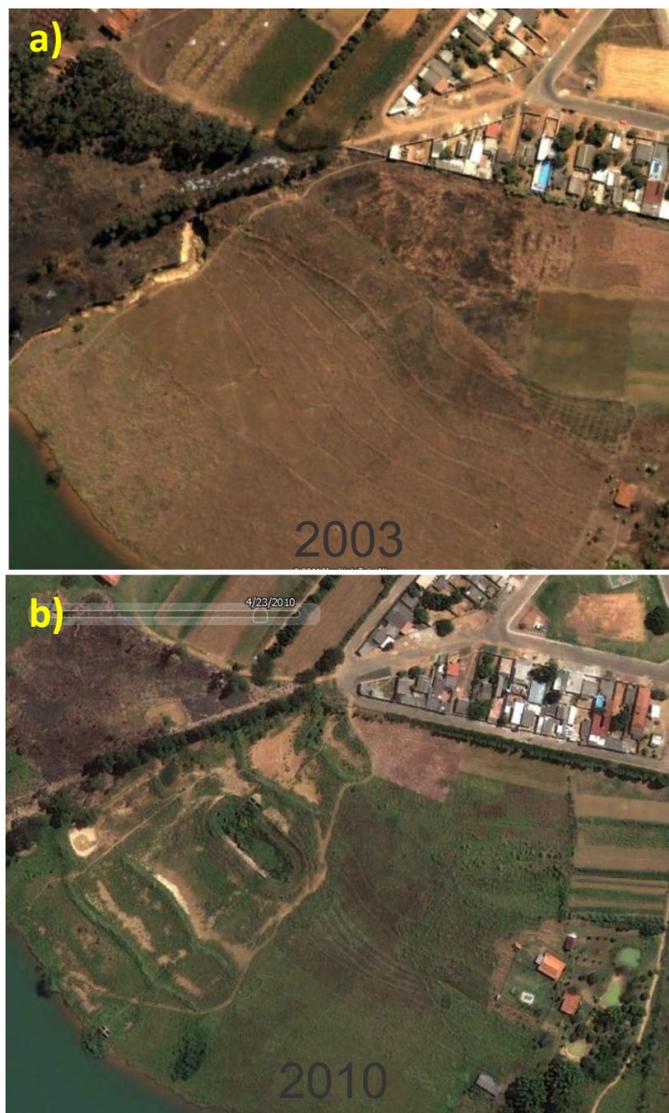


Figura 5.36 – a) Imagem de satélite de 2003 onde é possível ver a voçoroca e parte da área urbana do Incra 8; b) Imagem de satélite de 2010 na qual a voçoroca já foi recuperada e a área urbana ganhou incrementos de arruamentos.

No mapa de alteração do fluxo acumulado é possível identificar três áreas com acumulação do fluxo, essas áreas estão representadas em vermelho, entretanto em apenas duas existem processos erosivos (Figura 5.37). Na área que fica ao oeste existia uma voçoroca que já foi recuperada, ao sul existem indícios de que há um processo de erosão em lençol. Ao norte, a rua mais externa está toda murada e com isso a concentração de fluxo identificada desce, seguindo o arruamento, para o ponto onde o fluxo concentra ao oeste. A Figura 5.38 apresenta um gráfico onde estão plotados os valores de fluxo acumulado dos processos erosivos identificados e de locais onde não houve o desenvolvimento de desses processos, comparando a situação pré e pós-urbanizada (estes pontos estão localizados na Figura 5.37). Nesta área de estudo é possível identificar uma forte correlação do aumento do fluxo acumulado com a ocorrência dos processos erosivos.

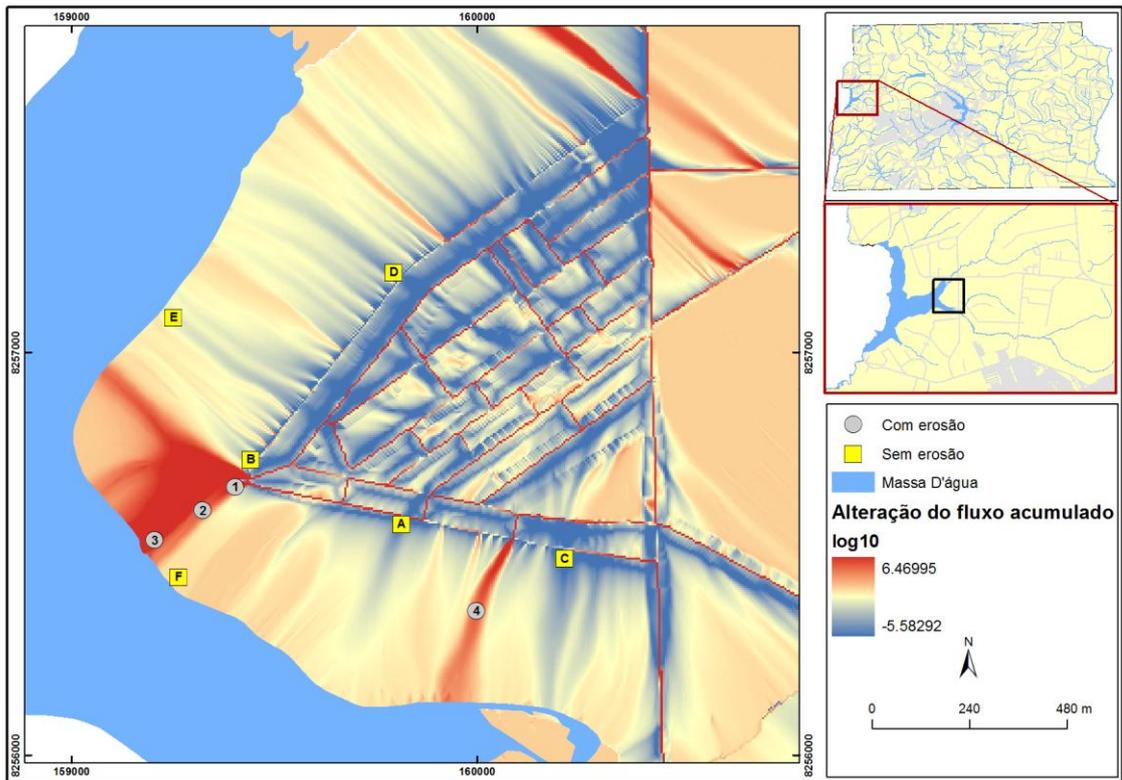


Figura 5.37 – Mapa de alteração do fluxo acumulado no Inca 8 (diferença de fluxo acumulado entre o mapa pré e o pós-urbanizado). Os círculos representam os pontos que tiveram aumento de fluxo e produziram erosões e os quadrados representam os pontos que não apresentaram aumento de fluxo e não produziram erosões.

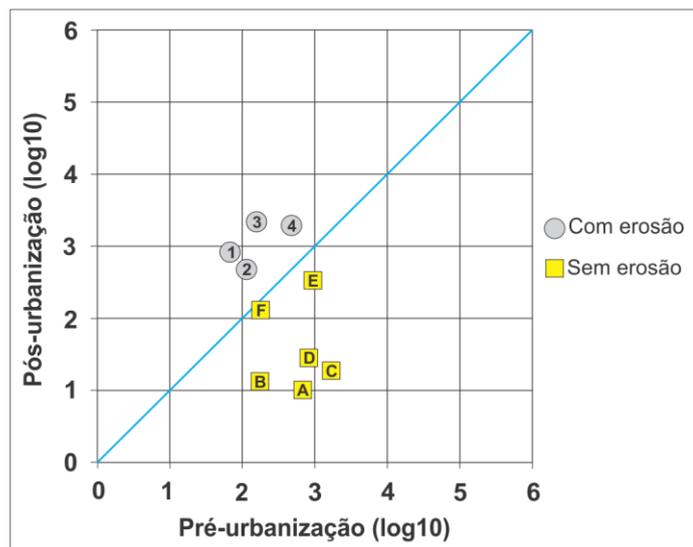


Figura 5.38 – O gráfico representa o comportamento da quantidade de fluxo relativo a pré e pós urbanização. Os círculos (com erosões) e os quadrados (sem erosões) estão também representados na Figura 5.37.

## **5.2. Análise das voçorocas segundo os condicionantes físicos**

Na tentativa de entender melhor os condicionantes físicos que contribuem com a ocorrência de voçorocas e ravinas em ambientes urbanos e periurbanos, as quatro áreas foram comparadas aos mapas de classes de relevo, geologia, geomorfologia e solos. Também foram extraídos os valores de declividade de cada pixel correspondente à área das voçorocas e ravinas e foi calculado os valores médio, mínimo, máximo, amplitude e desvio-padrão.

### **5.2.1. Análise das voçorocas com as classes de relevo**

A ocorrência das voçorocas está em duas situações distintas: no Gama e no Jardim Botânico as voçorocas estão vinculadas com classes de relevo que vão de ondulado a forte ondulado e que apresentam, majoritariamente, declividades entre  $>8\%$  a  $\leq 45\%$ . Já na Ceilândia e no Incra 8 as classes de relevo, onde ocorrem as voçorocas, vão de suave ondulado a ondulado e que apresentam declividades entre  $>3\%$  a  $\leq 20\%$  (Figura 5.39).

### **5.2.2. Análise das voçorocas com a geologia**

Ao comparar as áreas de ocorrência das voçorocas com a geologia local (Figura 5.40), observa-se que estão localizadas próximas as áreas de ocorrência das Coberturas Detrito-lateríticas Terciário-Quaternárias (TQdl), sendo que a do Gama e do Jardim Botânico ocorrem na Unidade Mpa3 (Grupo Paranoá - Unidade Rítmica Quartzítica Intermediária) e uma das voçorocas do Jardim Botânico que está no contato TQdl com Mpc (Grupo Canastra - Formação Paracatu). As voçorocas da Ceilândia ocorrem em sua maioria em cima da TQdl próximas ao contato com as Unidades Mpa3qt e Mpa3 e no Incra 8 apenas na TQdl.

### **5.2.3. Análise das voçorocas com a geomorfologia**

Com relação a Geomorfologia as voçorocas apresentam características que se dividem em dois grupos: do Jardim Botânico com o Gama, onde em ambos, a ocorrência das voçorocas está associadas às superfícies tabulares (Dt21), relevo de aplainamento/dissecação, sendo que no Jardim Botânico essa faz contato com o domínio de colinas e morros (Dc35) e no Gama com degraus estruturais (De), ambos relevos de dissecação. Já no Incra 8 as voçorocas estão na superfície tabular (Dt22) e na Ceilândia no topo de chapada (Dp), bem próximo à Dt22 (Figura 5.41).

### **5.2.4. Análise das voçorocas com as classes de solos**

Os solos também estão organizados em dois grupos, assim como na geomorfologia e nas classes de declividade. Na área urbana do Jardim Botânico não há informações de solos nos locais das voçorocas, mas pode-se inferir que elas estão próximas a transição do

LVd5 (Associação de Latossolo Vermelho + Latossolo Vermelho-Amarelo) com o CXbd4 (Cambissolo). O mesmo ocorre no Gama, onde não há informações sobre o solo na região urbana, não sendo possível identificar com clareza o limite entre o LVAd1 (Latossolo Vermelho-Amarelo) e LVAd6 (Associação de Latossolo Vermelho-Amarelo + Latossolo Vermelho) com o CXbd4, mas com base na disposição das classes de solos em seu entorno é possível inferir que a maioria das voçorocas está no CXbd4 (Figura 5.42).

Na Ceilândia as voçorocas ocorrem no contato do LVd5 (Latossolo Vermelho + Latossolo Vermelho-Amarelo) com o LVAd7 (Associação de Latossolo Vermelho-Amarelo Textura Média + Latossolo Vermelho-Amarelo Textura Argilosa + Cambissolo Háplico) e no Incra 8, ocorre no LVAd7 (Figura 5.42).

### **5.2.5 Análise das voçorocas com a declividade**

Ao analisar os valores de declividade nas cicatrizes das voçorocas e ravinas (Tabela 5.1), é possível verificar que, nas áreas estudadas, as voçorocas e ravinas ocorreram onde houve o aumento de fluxo acumulado em conjunto com valores de declividades acima de 5%. A Figura 5.43 apresenta as classes de declividade identificadas na tabela e a localização das erosões.

Martins (2005) realizou um trabalho de cadastramento de erosões no Distrito Federal. Nesse trabalho foi identificado que as erosões ocorrem, principalmente, em locais com declividade entre 5% a 10%, o que representa 32% das ocorrências das voçorocas estudadas. Já nas áreas com declividade entre 10% e 20%, com 26% das ocorrências, e > 20% representando 17% das erosões cadastradas resultam que 75% das erosões estão acima dos 5% de declividade (Figura 5.44).

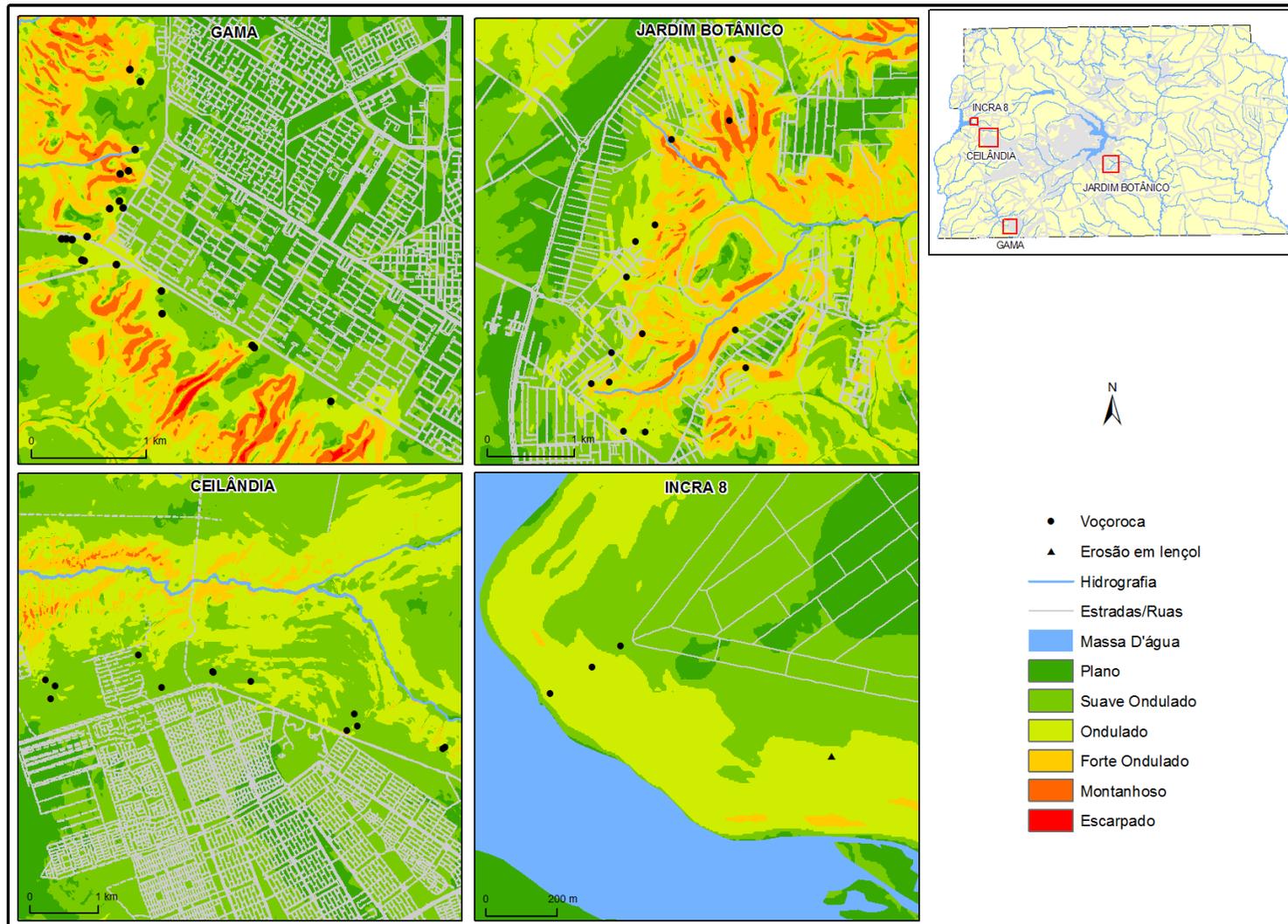


Figura 5.39 – Comparação das classes de declividades com a localização das voçorocas nas quatro áreas de estudo.



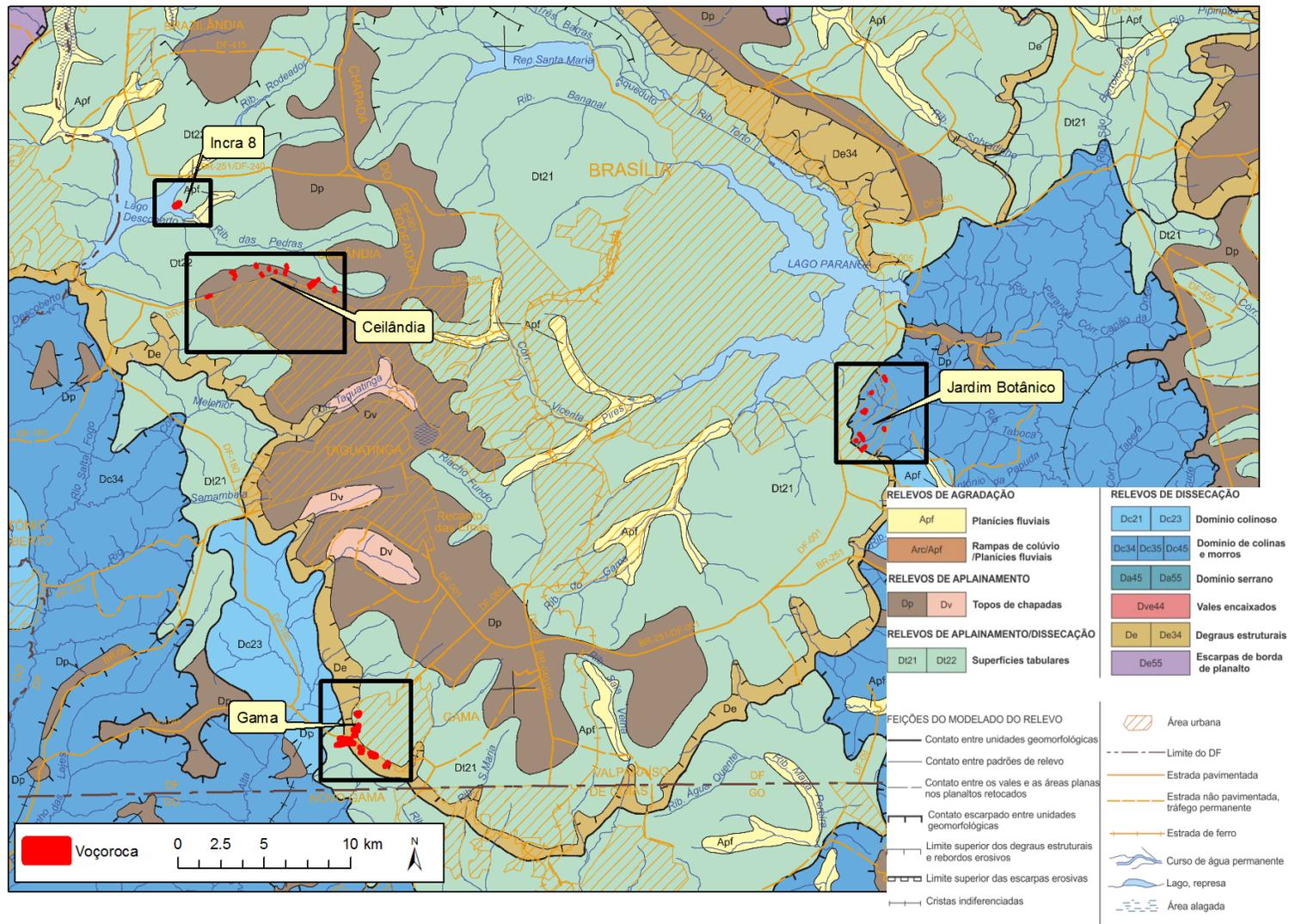


Figura 5.41 – Localização das voçorocas em relação a geomorfologia.

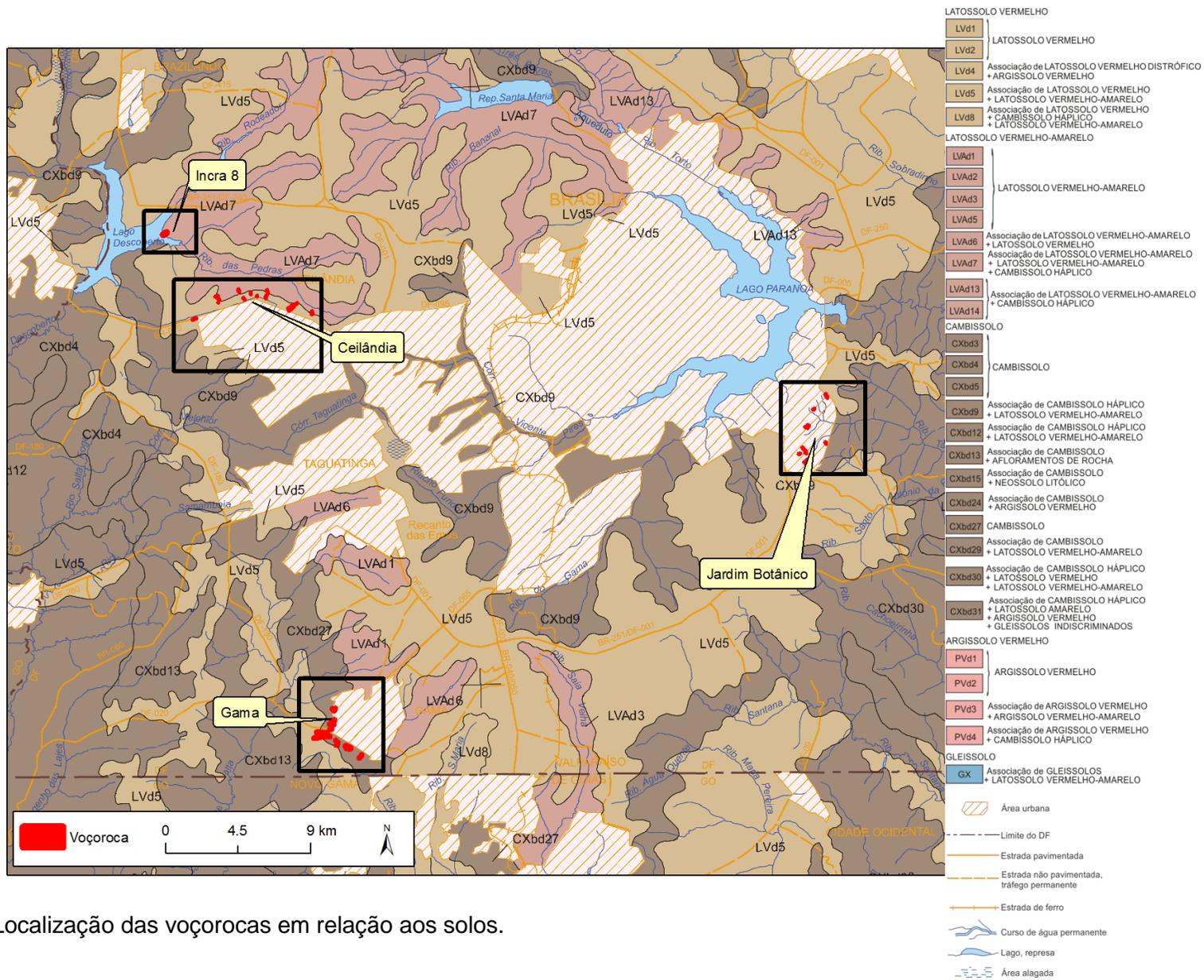


Figura 5.42 – Localização das voçorocas em relação aos solos.

Tabela 5.1 – Comparação dos valores de declividade nas áreas das voçorocas. As células em vermelho representam as voçorocas nas quais o modelo de alteração de fluxo identificou aumento de fluxo; As células em verde representam as voçorocas nas quais o modelo não identificou aumento de fluxo acumulado.

Número de pixels	Declividade (em %)			Desvio Padrão	Amplitude	Nome da Área	Identificação da Voçoroca*
	Média	Mínima	Máxima				
31	38.66	9.75	55.81	15.22	46.05	Jardim Botânico	2
50	36.00	22.52	43.62	4.78	21.10	Jardim Botânico	4
141	29.18	5.68	52.12	11.57	46.44	Gama	X2
80	23.70	11.79	32.27	5.45	20.48	Gama	X1
19	19.98	11.38	25.91	5.38	14.53	Gama	7
140	17.98	4.65	26.79	5.77	22.14	Jardim Botânico	1
1103	17.55	0.02	43.15	8.80	43.14	Gama	1
37	16.72	9.64	24.21	3.85	14.57	Jardim Botânico	6
109	15.61	4.24	41.40	10.40	37.16	Gama	X9
235	15.36	7.93	29.73	4.85	21.80	Jardim Botânico	7
28	15.30	10.26	20.92	2.87	10.66	Gama	X3
15	14.61	13.81	15.48	0.43	1.68	Jardim Botânico	3
32	13.37	5.50	25.99	8.00	20.49	Gama	6
70	13.13	3.82	20.85	4.70	17.03	Gama	X6
109	13.00	4.85	18.29	3.22	13.45	Gama	X4
232	12.72	5.07	37.35	6.87	32.28	Gama	X5
40	11.67	8.68	14.83	1.91	6.15	Jardim Botânico	
56	11.12	4.56	21.72	3.94	17.16	Gama	X8
11	11.08	7.83	13.79	2.41	5.96	Gama	4
128	10.44	6.32	22.40	4.23	16.08	Jardim Botânico	5
17	9.69	7.61	13.35	2.10	5.74	Gama	2
46	9.22	3.64	19.31	3.81	15.67	Gama	X7
160	5.34	3.29	8.25	1.64	4.96	Gama	5
227	5.25	2.26	9.72	1.99	7.47	Ceilândia	6
68	5.23	2.83	6.93	1.19	4.10	INCRA 8	1
118	3.88	2.43	7.91	1.54	5.47	Ceilândia	2**
164	3.32	2.91	4.08	0.33	1.17	Ceilândia	X5
53	3.22	2.80	3.93	0.36	1.12	Ceilândia	X6
17	3.07	2.53	3.52	0.36	1.00	Ceilândia	A
336	2.99	1.52	5.01	0.67	3.48	Ceilândia	4
52	2.58	2.44	2.78	0.08	0.34	Ceilândia	7
58	2.56	1.70	4.61	0.97	2.91	Ceilândia	3
69	2.53	1.63	6.05	0.55	4.42	Ceilândia	5
3	2.48	2.45	2.50	0.03	0.05	Ceilândia	X2
78	2.38	0.67	4.23	0.74	3.56	Ceilândia	X3
94	2.35	2.09	3.08	0.31	0.99	Ceilândia	X4
100	2.16	1.31	2.92	0.33	1.61	Ceilândia	1
275	0.75	0.63	0.88	0.08	0.25	Ceilândia	X1

\* As voçorocas com o X na frente do número não foram analisadas nos gráficos.

\*\* parte a jusante da voçoroca está contida na classe > 5%.

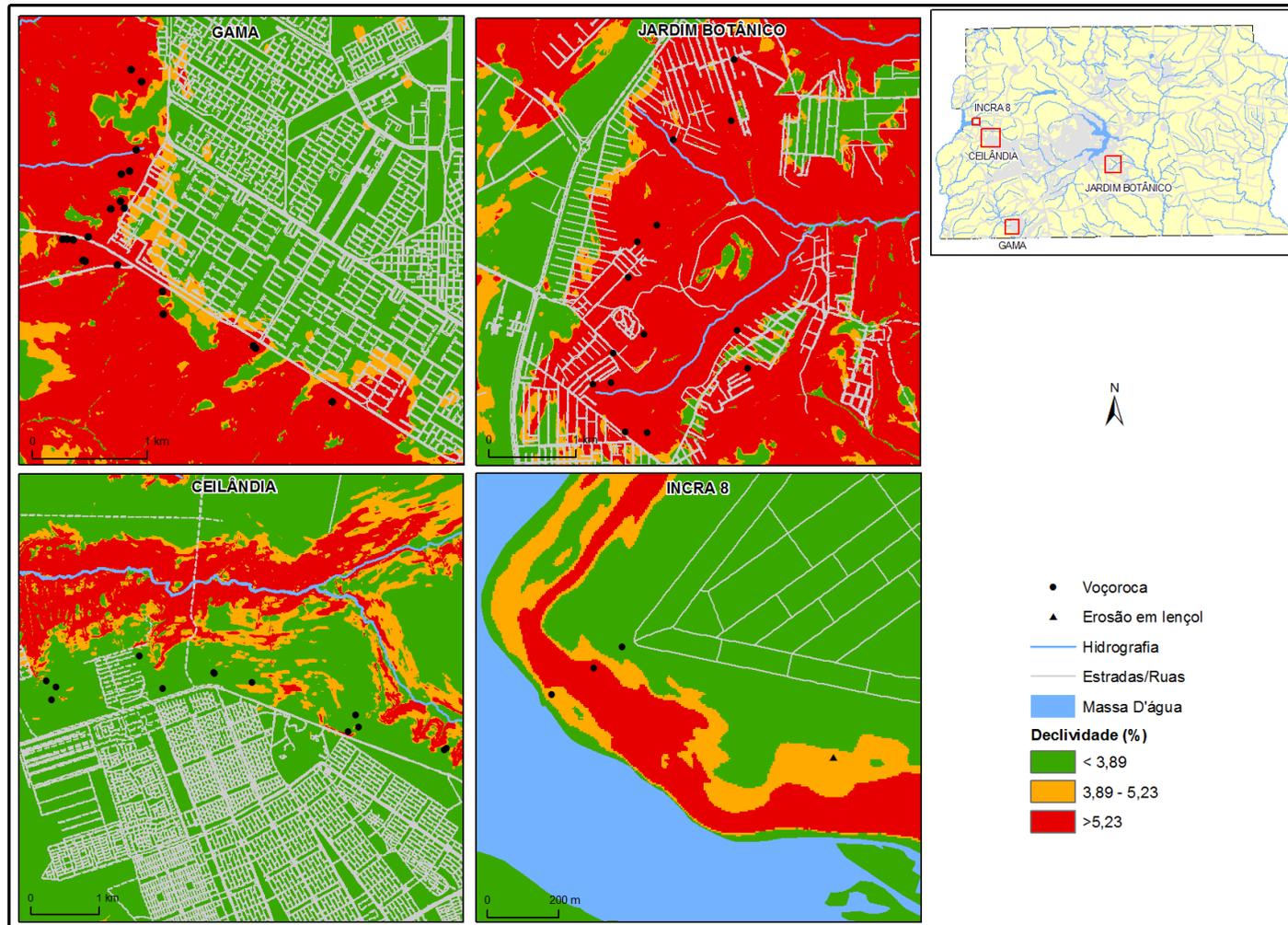


Figura 5.43 – Declividade classificada de acordo com os valores de declividade média identificados na Tabela 5.1 e separada em três classes. No Incra 8 os três pontos que aparecem são da mesma voçoroca e o triângulo é referente a um processo de erosão em lençol.

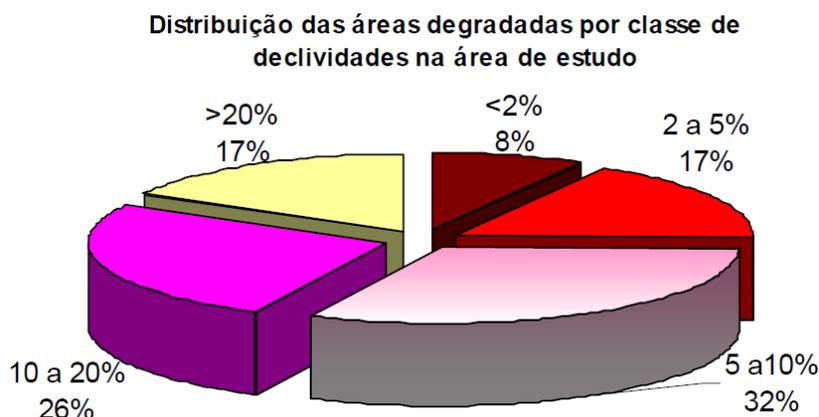


Figura 5.44 – Percentual de erosões cadastradas por Martins (2005) em relação à declividade.

### 5.3. Discussão dos resultados

Comparando as áreas pelos aspectos de classes de relevo, geológicos, geomorfológicos, pedológico, é possível identificar que todas indicaram que as voçorocas ocorrem em áreas de contato entre unidades. Estas apontaram para a existência de dois grupos: Gama/Jardim Botânico e Ceilândia/Incrá 8. Entretanto ao analisar a declividade média das cicatrizes das voçorocas surgiu um novo grupo: Gama/Jardim Botânico/Incrá 8.

No grupo Gama/Jardim Botânico/Incrá 8 o modelo identificou com alto nível de acerto a ocorrência das voçorocas com as alterações do terreno pela urbanização da área. Já na Ceilândia apenas em um local foi identificado o aumento de fluxo com a ocorrência de uma voçoroca, sendo que neste, a declividade média é condizente com os valores das outras áreas, onde o modelo de alteração de fluxo acumulado foi eficiente. Outros pontos, sem ocorrência de erosões, tiveram a concentração de fluxo identificada, mas apresentam baixos valores de declividade. Assim, é possível afirmar que a declividade tem papel fundamental no desenvolvimento dessas erosões.

Nas áreas do Gama, Jardim Botânico e Incra 8 é possível notar uma relação direta da alteração da superfície com a ocorrência das voçorocas, mesmo que as características físicas não sejam determinantes como no Incra 8. Na Ceilândia a ocorrência das voçorocas tem relação com outros aspectos, como: a) o sistema de drenagem urbana, que faz a coleta na área urbana e a descarga da água não tem estrutura eficaz para diminuir seu potencial erosivo, ou b) onde, pequenas alterações não cartografadas (devido a idade do mapeamento) ou não cartografáveis (devido a escala do mapeamento) como trilhas, obras mal planejadas de drenagem, obras para passagem das adutoras de água ou outra intervenção que tenha alterado o terreno.

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação de um modelo para identificar na paisagem zonas suscetível à ocorrência de voçorocas e ravinas demonstrou que, nas áreas estudadas, o desenvolvimento de elementos urbanos como os arruamentos e as edificações, é determinante para a produção destes processos erosivos, principalmente em locais de declividade superior a 5%.

Para a identificação das alterações na superfície, onde se localiza a área urbana, foi necessária a obtenção de um MDT que representasse as características do terreno após a urbanização, como as edificações e os arruamentos. Tendo como base esse terreno pós-urbanização e outro no estágio de pré-urbanização, foi possível identificar as alterações na dinâmica do escoamento superficial.

Os ajustes realizados para obtenção do MDT permitiram que o resultado ficasse mais próximo da realidade. As modificações feitas nos valores dos parâmetros de interpolação possibilitaram minimizar o efeito escada do modelo, criando declividades menos acentuadas e mais constantes ao longo da encosta e, conseqüentemente, permitiram melhorar o mapa de fluxo acumulado, parâmetro fundamental do modelo.

Quando analisadas pelo ponto de vista geológico, geomorfológico e pedológico, as quatro áreas estudadas foram divididas em dois grupos: 1) Gama/Jardim Botânico; e 2) Ceilândia/Incrá 8. Contudo, ao analisar a declividade referente às cicatrizes das voçorocas e ravinas houve um rearranjo dessas áreas, onde o Gama, Jardim Botânico e Incra 8 apresentaram valores de declividades médias, nas áreas das voçorocas e ravinas estudadas, acima de 5% e a indicação de concentração de fluxo pelo modelo para esses pontos. Isto mostra que a alteração da superfície tem grande influência no desenvolvimento das voçorocas e ravinas, e que são agravadas quando associadas a locais de maior declividade.

Os resultados obtidos para a área da Ceilândia divergem das demais áreas estudadas, pois, aparentemente existem outros fatores, como a existência de um sistema de drenagem urbana subsuperficial, mal dimensionado ou com a estrutura de descarga das águas coletadas construído em local impróprio podendo ser o responsável pelo desenvolvimento das erosões, fazendo com que ocorram voçorocas e ravinas em locais onde o modelo não identifique concentração de fluxo. Outra justificativa está atrelada a questão da resolução espacial utilizada no trabalho. Ceilândia, por ter um relevo mais suave, com declividades menores, o MDT pode também não ter identificado com precisão o caminho preferencial de fluxo, o que impediu a identificação das áreas que realmente aconteceram o aumento de fluxo.

Desta forma, trabalhos futuros serão necessários para identificação dos fatores que deram origem as voçorocas da Ceilândia. Isso por que no início do trabalho, na fase de definição das áreas para o estudo, as voçorocas da Ceilândia aparentavam uma relação direta com a implantação das edificações e arruamentos, mas os resultados não corroboraram essa teoria.

A metodologia aplicada permite fornecer ao planejador, a partir da dinâmica evolutiva do terreno, devido a urbanização, a identificação na paisagem de áreas que sofreram ou sofrerão aumento de fluxo superficial. Isto possibilita que intervenções possam ser feitas no sentido de redistribuir o fluxo para que novos processos erosivos sejam evitados e os já existentes sejam mitigados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCAYA, S. G. C. **Avaliação dos Fatores Condicionantes dos Processos Erosivos no Distrito Federal**. 2007. 189 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2007.
- BERTONI, J., & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.
- BELCHER, D. J. & ASSOCIATES. **O Relatório Técnico sobre a Nova Capital: Relatório Belcher**. Rio de Janeiro: Dasp, 1954. 291 p.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. Controle de erosão urbana e periurbana. In: BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. v.3, p. 961-963.
- BRASIL. **Zoneamento ecológico-econômico da região integrada de desenvolvimento do Distrito Federal e entorno: fase I**. – Rio de Janeiro: CPRM.Serviço Geológico do Brasil; Embrapa; MI/SCO, 2003.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; FREITAS, L. F.; GOMES-LOEBMANN, D.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; MONTGOMERY, D. R. Urbanization Impacts Upon Catchment hydrology and Gully Development Using Multi-temporal Digital Elevation Data Analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, n. 5, p. 611-617, 2010.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 185 p.
- CODEPLAN. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília: GDF, 1984. v1, 78 p.
- CODEPLAN. **Síntese de Informações Socioeconômicas. Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central** – CODEPLAN. Brasília: Codeplan, 2010. 89 p.
- CONDÉ, R. C. C. Vegetação do Distrito Federal. In: **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**. Brasília; SEMATEC: IEMA: MMA-SRH, 1999. 1 CD-ROM.
- CUNHA, S. B. & GUERRA, A. T. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. T. & CUNHA, S. B. (Org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2010. p. 337-371.

- DIETRICH, W. E.; WILSON C. J.; MONTGOMERY, D. R.; MCKEAN J. Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks and Landscape Morphology Using a Digital Terrain Model, **Journal of Geology**, v. 101, n. 2, p. 161-180, 1993.
- DISTRITO FEDERAL. **Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal** - Volume 4. Brasília; Secretaria de Estado de Obras: Concremat Engenharia, 2008. 145 p.
- EITEN, G. Vegetação do Cerrado. In: NOVAES PINTO, M. (Org.) **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1990. p. 9-65.
- EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Boletim Técnico, 53. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1978. 455 p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 412 p.
- ERSKINE, R.H.; GREEN, T.R.; RAMIREZ, J.A. & MACDONALD, L. H. Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resources Research* v. 42, p. 1 – 9. 2006. ESRI, **Understanding GIS – The ARC/INFO Method**. *Environmental Systems Research Institute*, Wiley, New York, 1993. 535 p.
- FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.) **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 2001. p. 1-38.
- FREITAS-SILVA, F. H. & CAMPOS, J. E. G. Geologia do Distrito Federal. In: **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal** - Volume I. Brasília; SEMATEC: IEMA: MMA-SRH, 1999. 1 CD-ROM.
- GUERRA, A. J. T.. Ravinas: Processos de Formação e Desenvolvimento. **Anuário do Instituto de Geociências** v. 20, p. 9-26, 1997.
- GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.) **Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasi, 2003. p. 149-209.
- GUERRA, A. J. T. O início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. T.; SILVA, A. S. & BOTELHO, R. G. M. (Org.) **Erosão e Conservação dos Solos**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 17-50.
- HENGL, T & EVANS, I. S. Mathematical and Digital Models of the Land Surface. In: HENGL, T. & REUTER, H. I. (Ed.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam, Elsevier, 2009. p. 31-64.
- HORTON, R. E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. **Bulletin of The Geological Society of America**. V. 56, p. 275-370. 1945.

- HUTCHINSON, M.F. **Calculation of hydrologically sound digital elevation models.** Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling. August 17-19, Sydney. International Geographical Union, Columbus, Ohio, 1988. p. 117-133.
- HUTCHINSON, M.F. A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits. **Journal of Hydrology** v. 106, n. 3-4, p. 211-232, 1989.
- HUTCHINSON, M. F.; XU, T. & STEIN, J. A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In: **Geomorphometry 2011**, Hengel, T.; Evans, I.S.; Wilson, J.P. & Gould, M. (Ed.) Redlands, California, USA, 2011. p. 19-22.
- LEOPOLD, L. B. **Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use.** Washington: United States Department of the Interior, 1968. 18 p.
- MARK, O.; WEESAKUL, S.; APIRUMANEKUL, C.; AROONNET, S. B.; DJORDJEVIĆ, S. Potential and Limitations of 1D Modeling of Urban Flooding. **Journal of Hydrology**, v. 299, n. 3-4, p. 284-299, 2004.
- MARTINS, E. O. **Cadastro Georreferenciado de Erosões no Distrito Federal – DF.** 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2005.
- MARTINS, E. S.; REATTO, A.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F. **Evolução Geomorfológica do Distrito Federal.** Documentos, n. 122, 2004. 57 p.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. *A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding.* **Water Resources Research**, vol. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- MORTARI, D. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Distrito Federal.** 1994. 200 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 1994.
- NOVAES PINTO, M. Caracterização Geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (Org.) **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas.** Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1990. p. 277-308.
- OLAYA, V. Basic Land-Surface Parameters. In: HENGL, T. & REUTER, H. I. (Ed.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications.** Amsterdam, Elsevier, 2009. p. 141-170.
- OLIVEIRA, A. M. S.; PONÇANO, W. L.; SALOMÃO, F. X. T.; DONZELI, P.L.; ROCHA, G. A.; e VALÉRIO FILHO, M. Questões Metodológicas em Diagnósticos Regionais de Erosão: A Experiência Pioneira da Bacia do Peixe Paranapanema – SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4., 1987, Marília, . **Anais...** São Paulo: ABGE/DAEE, p. 51-71. 1987.

- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 28, n. 3, p. 328-344, 1984.
- O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- PAVIANI, A. Geografia Urbana do Distrito Federal: Evolução e Tendências. **Espaço & Geografia**, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2007
- PIKE, J. R. Geomorphometry – Diversity in Quantitative Surface Analysis. **Progress in Physical Geography**. v. 24, n. 1, p. 1-20, 2000.
- PORTO, R.; ZAHED F., K.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F. Drenagem Urbana. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 2004. p. 805-847.
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models. *In*: BEVEN, K. J.; MOORE, I.D. (Ed.), **Terrain Analysis and distributed Modelling in Hydrology**. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1991. p. 63 - 84.
- RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO A. L.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. & CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicação do Modelo SHALSTAB, em Ambiente ArcView, para o Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Escorregamento Raso na Região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, v.5, n. 1, p.49-67, 2002.
- RAMOS, V. M. ; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; FERREIRA, N. F.; GOMES, R. A. T. Avaliação de Metodologias de Determinação do Cálculo de Áreas de Contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Uberlândia, v. 4, p. 41-49, 2003.
- REZENDE, A; NILSON, A. A.; SILVA, A.; ALVARENGA, C. J. S.; GEBRIM, E.; GODOI, E. O.; LACERDA FILHO J. V.; DANNI, J. C. M; CAMPOS, J. E. G.; BRILHANTE, J. R.; DARDENNE, M. A.; RESENDE, M. ; PIMENTEL, M. M.; BOTELHO, N. F.; BARBOSA, P. A. R.; VILLAS BOAS, P. F.; LIMA, T. M. & WILSON RIBEIRO FILHO, W. Descrição das unidades litoestratigráficas do estado de Goiás e do Distrito Federal. *In*: Joffre Valmório de Lacerda Filho, Abelson Rezende e Aurelene da Silva (Org.). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Escala 1:500.000. 2ª edição. Goiânia: CPRM/METAGO/UnB, 2000. 1 CD-ROM.
- SALOMÃO, F. X. T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. *In*: GUERRA, A. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Ed.) **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 228-267.
- SILVA JÚNIOR, M. C. & FELFILI, J. M. **A vegetação da Estação Ecológica de Águas Emendadas**. Brasília. SEMATC/IEMA. 1996. 43 p.

- TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, v. 33, n. 2, p. 309-319. 1997.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. *In*: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 2004. p. 805-847.
- WISCHMEIER, W. H. & MANNERING, J. V. Relation of Soil Properties to its Erodibility. **Proceedings of Soil Science Society of America**, v. 33, p. 133-137. 1969.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. **Predicting Rainfall Erosion Losses** – A guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook nº 357. Washington, U.S. Department of Agriculture. 1978. 58 p.

## ANEXO A

Script do algoritmo *drain\_direction.aml*<sup>4</sup>, utilizado para correção da direção de fluxo com base no MDT.

```
/* -----
/* drain_direction.aml
/* -----
/*
/* Flips drainage arcs such that all streams face downhill. Can only calculate
/* direction based on the entire arc - it is possible to have sections of the
/* stream running uphill. All we can do here is ensure the end node is lower
/* than the start node, and assume the drainage network is of sufficient
/* quality and accuracy.
/*
/* The approach here is to copy the original coverage, and make any changes
/* to the new cover. This step could be omitted, and changes made to the
/* original coverage if desired.
/*
/* Requires elevation grid covering the drainage coverage area. (We don't
/* bother testing that the grid and coverage coincide spatially, although
/* they must for the program to work.)
/*
/* History
/* Sept 1998 Original coding - Stephen Lead
/* 7 May 1999 - removed some typos (SL)
/*
/* Please report any problems or other comments to slead@esriau.com.au
/*
/* =====
&severity &error &routine bailout

&args dem draincov
&call checkargs
&call process

&return

/* =====
&routine process

/* Copy draincov to a new cover, add some items. Convert the nodes to
/* points, get the elevation values at each point. We renode the
/* drainage cover to ensure that the node-id matches the arc
/* FNODE# and TNODE#.

&s drain %draincov%_f
&if [exist %drain% -cover] &then kill %drain% all
copy %draincov% %drain%
renode %drain%
&if [iteminfo %drain% -line f_elev -exists] &then
dropitem %drain%.aat %drain%.aat f_elev
&if [iteminfo %drain% -line t_elev -exists] &then
dropitem %drain%.aat %drain%.aat t_elev
additem %drain%.aat %drain%.aat f_elev 4 12 f 3
additem %drain%.aat %drain%.aat t_elev 4 12 f 3
&s nodecov [scratchname -prefix nd -directory]
nodepoint %drain% %nodecov%
build %nodecov% point
```

---

<sup>4</sup> Desenvolvido por Stephen Lead. Disponível em: <http://arcscrips.esri.com/details.asp?dbid=11314>. (Acessado em janeiro de 2011).

```

/* Transfer the height information from grid to nodepoint cover.
latticespot %dem% %nodecov% spot

/* Calculate the elevation at the From and To ends of the arc.
arcplot
aselect %drain% arcs
&s numarc [extract 1 [show select %drain% arcs]]
  &do i = 1 &to %numarc%
  &ty Arc %i% of %numarc%
  aselect %drain% arcs
  reselect %drain% arcs %drain%# = %i%
  &s fnode [show select %drain% arcs 1 item FNODE#]
  &s tnode [show select %drain% arcs 1 item TNODE#]
  &do dir &list f t
  aselect %nodecov% points
  reselect %nodecov% points %nodecov%-id = [value %dir%node]
  calc %drain% arc %dir%_elev = [show select %nodecov% point 1 item spot]
  &end
  &end
aselect %drain% arcs
reselect %drain% arcs f_elev < t_elev
&s num2flip [extract 1 [show select %drain% arcs]]
quit

/* Check whether there are any changes to be made.
&if %num2flip% > 0 &then
  &do

  /* Flip the affected arcs in ArcEdit.
  arcedit
  editcover %drain%
  editfeature arcs
  select f_elev < t_elev
  flip
  save
  removeedit all yes
  quit

  /* Remove the added items.
  dropitem %drain%.aat %drain%.aat
  (!f_elev t_elev!)
  end

  build %drain% line
  &s str %drain% is a copy of %draincov% with streams facing downstream...
  &end

&else
  &do
  kill %drain% all
  &s str There were no streams in %draincov% facing uphill - no changes.
  &end

/* Inform user of any changes, kill temporary cover.
kill %nodecov% all
&ty ; &ty %str%; &ty

&return

/* =====
&routin checkargs

&if [show program] ne ARC &then
  &do
  &s str Please run from Arc...; &call bailout
  &end
&if [null %dem%] | [quote %dem%] = '#' &then &call usage

```

```

&if [null %draincov%] | [quote %draincov%] = '#' &then &call usage
&if not [exist %dem% -grid] &then
  &do
    &s str Grid %dem% does not exist ...; &call bailout
  &end
&if not [exist %draincov% -cover] | not [exist %draincov% -clean] &then
  &do
    &s str Cover %draincov% does not exist or is not clean ...
    &call bailout
  &end
display 0

&return

/* =====
&routine usage

  &s str Usage: &r %aml$file% <elevation_grid> <drainage_cover>
  &return; &return &warning %str%

/* =====
&routine bailout

  &if not [variable str] &then &s str Bailing out of %aml$file%...
  &return; &return &warning %str%

/* =====
/* END OF FILE
/* =====

```